



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUUSO HUHTURI
HYDRAULILETKUASENNELMAN PUHTAUSMITTAUKSET

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 7. lokakuuta
2015

TIIVISTELMÄ

JUUSO HUHTURI: Hydrauliletkuasennelman puhtausmittaukset

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 66 sivua, 6 liitesivua

Marraskuu 2015

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Hydraulitekniikka

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen

Avainsanat: Letku-Kompu-projekti, ISO 16232, letkuasennelma

Hydraulijärjestelmän puhtaustaso on ennen tutkittu seuraamalla vain hydraulioöljyn puhtautta standardin ISO 4406 mukaan. Tämä mittaustapa ei ota huomioon komponentin valmistusprosessin aikana syntyviä epäpuhtauksia, jotka saattavat päästä järjestelmään kokoonpanon yhteydessä. Nämä epäpuhtaushiukkaset voivat aiheuttaa toimintahäiriöitä ja turhaa kulumista järjestelmän käyttöönottohetkellä, ennen kuin suodattimet kykenevät poistamaan ne öljykierrosta.

Suomessa on jo muutaman vuoden ajan selvitetty komponenttien puhtautta standardin ISO 16232 mukaan, pääosin Hydraulikan ja Automaatiikan laitoksen (IHA) toimesta. Nyt tutkimuksen tuloksena saadaan selville uuden, käyttämättömän letkuasennelman puhtaustaso. Tavoitteena on saada tietoa siitä hiukkasmäärästä, joka päättyy asennuksen kohteena olevaan hydraulijärjestelmään letkuasennelman mukana. Näiden mittausten lisäksi tutkitaan letkuliitoksen kytkemisen synnyttämää epäpuhtautta, suoritetaan puhtausmittauksia letkuasennelman valmistamisessa käytetyille komponenteille sekä vertaillaan letkun katkaisumenetelmien puhtautta.

Tässä työssä letkuasennelman sisältämät epäpuhtaushiukkaset irrotetaan puhtausmittauslaitteistolla, jossa huuhteluneste virtaa komponentin lävitse. Tämän jälkeen käytetty neste johdetaan kalvosuodattimelle. Kalvosuodattimen analysointi suoritetaan automaattisella mikroskoopilla, jolloin saadaan selville hiukkasten lukumäärä ja kokojakauma.

Letkuliitinten tuottamia hiukkasia mitataan kytkemällä huuhdeltu letkuasennelma testilaitteiston liitoksiin viisi kertaa ennen uudelleenhuuhteluita. Letkuasennelman valmistamisessa käytettävistä komponenteista hiukkaset irrotetaan painehuuhtelulla, kun taas letkujen katkaisuissa syntyneet epäpuhtaudet irrotetaan letkuista vapaasti virtaavalla nesteellä.

Mittausten perusteella letkuasennelman tulppapuhallus vähentää merkittävästi letkuasennelmassa olevia epäpuhtaushiukkasia. Letkuasennelman kytkemisvaiheessa on todennäköistä, että satunnaisia, kierre- tai pikaliittimistä peräisin olevia hiukkasia pääsee järjestelmään. Varastointipakkauksesta peräisin olleista letkuliittimistä irtoaa jonkin verran metallihiukkasia, kun taas letkuasennelman tulppaamisessa käytettävät kutsitesuojat ovat melko puhtaita. Letkuasennelman tulppapuhalluksessa käytettävien puhallustulppien puhtausmittaukset epäonnistuivat.

Puhtain tapa katkaista letku on käyttää kirvestä. Tulevaisuudessa olisi hyvä selvittää, kuinka suuri vaikutus puhtaustuloksiin on terän kunnolla käytettäessä koneellista katkaisua.

ABSTRACT

JUUSO HUHTURI: The cleanliness measurements of hydraulic hose assembly
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 66 pages, 6 Appendix pages
November 2015
Master's Degree Programme in Machine Technology
Major: Hydraulics
Examiner: Professor Jari Rinkinen

Keywords: Letku-Kompu-project, ISO-16232, hydraulic hose assembly

A Cleanliness level of hydraulic system has been before researched only by using oil cleanliness standard ISO 4406. In this case, the particles come from the manufacturing process are not considered. These contaminants can cause malfunctions and harmful wearing in the system start-up, before filters can remove them from the oil circuit.

During a couple of years in Finland has been measured component cleanliness according to the ISO 16232 standard mainly by Department of Intelligent Hydraulics and Automation (IHA). Now the result of this project is get to know the cleanliness level of the brand new hydraulic hose assembly. Then it is found out the number of particles, which ends up the system within hydraulic hose assembly. In addition it is measured particles caused by connecting the hose joint. It is also done cleanliness measurements for the components that are used in the manufacturing process of the hydraulic hose assembly. Lastly it is compared cleanliness of the hose cutting methods.

In the project, the particles are extracted from the hydraulic hoses in a component cleanliness rig, where solvent flows through the component. Then the solvent is filtered through a membrane filter. The number and size of particles can be analyzed by an automatic microscope system.

The contaminants caused by hose joints, are measured by connecting an extracted hose assembly to joints of test rig several times before re-extraction. The particles are extracted by pressure rising from the components that are used in the manufacturing process of the hydraulic hose assembly. The contaminants caused by hose cutting are extracted from hoses by freely flowing solvent.

Based on measurement results, plug blowing reduces significantly contaminants in the hose assembly. When connecting the hose assembly, probably some particles from hose fittings end up to the system. Hose fittings which are stored in the packet, are founded some metal particles. The plugs of hydraulic hose assembly have quite high cleanliness level. The measurements of the plug blowing plugs were unsuccessful.

To use an axe is the cleanest way to cut a hose. In the future it would be beneficial to research, how much a condition of cutting disc influences to cleanliness results in the industrial hose cutting.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Hydraulikan ja automatiikan laitokselle. Työn tarkoituksena on ollut tutkia letkuasennelman sekä siihen liittyvien työvaiheiden teknistä puhtautta. Projektin rahoittajana on toiminut Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiö.

Haluan kiittää työn tarkastajaa prof. Jari Rinkistä, jonka ansiosta tuli tilaisuus tehdä diplomityö mielenkiintoisesta ja käytännönläheisestä aiheesta. Hänen ohjaamisensa ansiosta projekti saavutti sille asetetut tavoitteet. Suuret kiitokset kuuluvat työn ohjaajalleni tutkija Lauri Elolle, joka on opastanut ja neuvonut aina pyydettyä. Hänen asiantuntemus on ollut tärkeää liittyen työskentelyyn komponenttipuhtauslaboratoriossa. Hydraulikan ja automatiikanlaitoksen asennushenkilökuntaa haluan kiittää mukavasta yhteistyöstä projektin aikana. Lisäksi haluan kiittää opiskelukaveriani Tobias Ekforsia, joka projektin alkuvaiheilla oli tukena ja juttuseurana vaikeinakin hetkinä.

Tampereella, 21.10.2015

Juuso Huhturi

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	HYDRAULIKOMPONENTTIEN TEKNINEN PUHTAUS	3
2.1	Letku-Kompu – hydraulikan letkuasennelmien puhtauden kehitysprojekti	4
2.2	Standardi ISO 16232 Maantieajoneuvot – Nestejärjestelmien komponenttien puhtaus	4
2.2.1	Järjestelmän nollapuhtauskoe	6
2.2.2	Testiprosessin työvälineet	8
2.2.3	Hiukkasten irrottaminen painehuuhtelulla	8
2.2.4	Hiukkasten irrottaminen testipenkissä	11
2.2.5	Hiukkaskoon ja lukumäärän laskenta mikroskoopilla	13
2.2.6	Tulosten esittäminen	14
3.	LETKUASENNELMIEN VALMISTUS JA HANKINTA	18
3.1	Letkustandardit	18
3.2	Tutkittavien letkuasennelmien hankinta	19
3.3	Letkuasennelmien valmistus	20
3.4	Valmistusprosessiin liittyvät epäpuhtauslähteet.....	22
4.	LETKUASENNELMIEN MITTAUS.....	24
4.1	Mittaukset Hydac CTU 1230 puhtaustestikaapilla.....	24
4.1.1	Kaapin rakenne ja toiminta.....	24
4.1.2	Alkuvalmistelut.....	26
4.1.3	Mittausten ja analysoinnin suoritus.....	26
4.1.4	Tulokset	28
4.2	Letkumittaukset IHA:n testipenkillä.....	30
4.2.1	Testipenkin rakenne ja toiminta.....	31
4.2.2	Letkuasennelman liittäminen testipenkkiin.....	32
4.2.3	Letkumittaukset	37
4.2.4	Letkumittausten tulokset	39
4.2.5	Käyttökokemuksia testipenkistä	40
4.3	Puhtaustestikaapilla ja testipenkillä saatujen tulosten vertailu	41
5.	LETKUASENNELMAN VALMISTAMISEEN LIITTYVÄT PUHTAUSMITTAUKSET	44
5.1	Letkuliitin	44
5.2	Kutistesuoja	46
5.3	Puhallustulppa	48
5.4	Letkun katkaisutavan vertailu	51
5.4.1	Letkukatkaisujen suoritus.....	51
5.4.2	Hiukkasten irrotus letkuista.....	53
5.4.3	Tulokset	55
6.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	60

6.1	Letkuasennelmien mittaukset.....	60
6.2	Letkuasennelman valmistamisen muut puhtausmittaukset.....	61
7.	YHTEENVETO.....	63
	LÄHTEET.....	65

LIITE 1: HIUKKASLASKENNAN TULOKSET PUHTAUSMITTAUKSISSA

LIITE 2: HIUKKASLASKENNAN TULOKSET NOLLAPUHTAUSNÄYTTEISSÄ

LIITE 3: KOMPONENTTIEN MÄRKÄPINTA-ALOJEN MÄÄRITYS

LYHENTEET JA MERKINNÄT

APC	Automaattinen hiukkaslaskuri (engl. Automatic Particle Counter)	
CCC	Komponentin puhtauskoodi (engl. Component Cleanliness Code)	
CTU	Contamination Test Unit	
IHA	Hydrauliikan ja automatiikan laitos (engl. Department of Intelligent Hydraulics and Automation)	
ISO	International Organization of Standardization	
LM	Valomikroskooppi (engl. Light Microscope)	
SEM	Pyhkäisyelektronimikroskooppi (engl. Scanning Electron Microscope)	
TPI	Hampaiden lukumäärä tuumaa kohti (engl. Tooth Per Inch)	
Kontrolloitu pinta-ala	Komponentin pinta-ala, johon kohdistuu puhtausvaatimus ja/tai se on puhtaustarkastuksen kohde.	
Märkäpinta-ala	Komponentin pinta-ala, joka altistetaan järjestelmän väliaineelle.	
Märkätilavuus	Komponentin tilavuus, joka altistetaan järjestelmän väliaineelle.	
A	Virtausta vastaan kohtisuorassa oleva poikkipinta-ala	[m ²]
d	Hydraulinen halkaisija	[m]
Q	Tilavuusvirta	[m ³ /s]
Re	Reynoldsin luku	[-]
S _i	Näytteen S _i puhtaustaso	[-]
S _n	Puhtausnäytteen n analysointitulos	[-]
S ₁	Puhtausnäytteen 1 analysointitulos	[-]
S ₂	Puhtausnäytteen 2 analysointitulos	[-]
S ₃	Puhtausnäytteen 3 analysointitulos	[-]
v	Keskimääräinen virtausnopeus	[m/s]
ν	Irrotusnesteen kinemaattinen viskositeetti	[m ² /s]

1. JOHDANTO

Puhtaus on keskeinen asia, kun on kyse hydraulijärjestelmän toimintavarmuudesta. Järjestelmässä olevat epäpuhtaudet nopeuttavat eri hydraulikomponenttien kulumista, jolloin niiden käyttöikä alenee. Lisäksi epäpuhtaushiukkaset voivat aiheuttaa välittömiä toimintahäiriöitä jumittamalla esimerkiksi venttiilin luistin. Hydraulijärjestelmän öljyn suodatuksella varmistetaan riittävä puhtaustaso normaalin käytön aikana, mutta järjestelmän käyttöönottohetkellä komponenttien sisältämät epäpuhtaushiukkaset saattavat aiheuttaa vahinkoa järjestelmän komponenteille.

Hydraulikomponenttien alkuepäpuhtaus johtuu niiden valmistuksen aikana syntyvistä hiukkasista, jotka jäävät puhdistuksesta huolimatta komponentin märkäpinnoille. Myös pakkaamisen, kuljetuksen, varastoinnin ja asennuksen aikana voi kulkeutua haitallisia epäpuhtaushiukkasia komponenttiin. Hydraulijärjestelmän käyttöönotossa tapahtuvien häiriöiden vähentämiseksi on siis tärkeää, että järjestelmä sisältäisi mahdollisimman puhtaita komponentteja.

Hydraulikomponenttien puhtautta on Suomessa aikaisemmin mitattu välillisesti käyttämällä öljyn puhtausstandardia ISO 4406 Hydraulinesteiden puhtaus. Standardin avulla saadaan selville järjestelmässä kiertävän öljyn puhtaustaso, mutta se ei kerro mitään yksittäisten komponenttien sisältämistä hiukkasista. Lisäksi ISO 4406-standardi kuvaa öljyn puhtautta kumulatiivisissa hiukkaskokoluokissa ($\geq 4 \mu m_{(c)}$, $\geq 6 \mu m_{(c)}$ ja $\geq 14 \mu m_{(c)}$), jonka seurauksena suurten hiukkasten tarkasta lukumäärästä ei saada selvyyttä.

Komponenttien teknisen puhtauden ilmoittamiseksi, on vuonna 2007 julkaistu standardi ISO 16232 Maantieajoneuvot – Nestejärjestelmien komponenttien puhtaus. Standardin avulla kyetään selvittämään autoteollisuudessa käytettävien nestejärjestelmien komponenttien puhtaustasoa, ja jonka tutkimiseen se pyrkii antamaan selkeät mittaussuomenetelmät. Standardi on hyvin sovellettavissa myös hydraulikomponentteihin, jollaisia esimerkiksi auton nestekäyttöinen jarrujärjestelmä sisältää.

Tämä Letku-Kompu-projekti on jatkoa vuonna 2014 käynnistyneelle tutkimukselle, jolloin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Hydrauliiikan ja automatiikan laitoksella alettiin kehittää komponenttipuhtauden mittausspalveluita teollisuuden käyttöön. Komponenttipuhtautta parantamalla pyritään luomaan komponenttitoimittajien asiakkaina toimiville koneenrakentajille parempaa kilpailukykyä.

Tässä tutkimuksessa pääpaino on uusien letkuasennelmien puhtausmittauksissa. Mittausten tarkoitus on selvittää letkuasennelmien sisältämien epäpuhtaushiukkasten lukumäärä ja kokojakauma. Tämän perustella letkutoimittajat voivat kehittää omaa valmistusprosessiaan vähemmän epäpuhtautta tuottavaksi. Letkumittausten ohessa tehdään tutkimus, jossa mitataan kierre - ja pikaliitoksen liittämisvaiheessa syntyviä epäpuhtaushiukkasia. Lisäksi suoritetaan puhtausmittauksia letkuasennelman valmistamisessa käytetyille komponenteille. Tutkimuksen neljäntenä osa-alueena on letkun katkaisutavan vertailu, jossa selvitetään eri katkaisumenetelmien tuottamia epäpuhtausmääriä letkuun.

Letkuasennelmat tutkitaan perustuen standardin ISO 16232 esittämiin menetelmiin IHA:n komponenttipuhtauslaboratoriossa. Letkuasennelmat hankitaan letkutoimittajilta tavallisena asiakastilauksena. Mittauksissa käytetään Hydac CTU 1230 puhtaustestikaappia, jolla tutkittavat letkuasennelmat huuhdellaan käyttämällä standardisarjan ISO 16232 viidennen osan käsittelemää testipenkkimenetelmää. Sen jälkeen kalvosuodattimelle irrotetut hiukkaset analysoidaan mikroskoopilla hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman selvittämiseksi. Saatua tulos ilmoitetaan CCC-koodin avulla, joka kuvaa tutkitun letkuasennelman puhtaustasoa ilmoittaen esiintyneet hiukkaslukumäärät lajiteltuna kokoluokittain.

Vertailun vuoksi samat letkuasennelmien huuhtelut toistetaan myös IHA:n omalla testipenkillä, joka on valmistettu hydraulikomponenttien puhtausmittauksia varten. Testipenkillä suoritetaan myös liitoksien kytkentää tutkivat mittaukset. Letkun katkaisutavan vertailussa letkumateriaalia katkastaan eri työmenetelmillä, jonka jälkeen katkaistun letkuosuuden sisään jääneet hiukkaset irrotetaan kaatosuppiloon ja alipaineeseen perustuvalla hiukkastenkeräyslaitteistolla. Letkuasennelman valmistuksessa käytettäviä komponentteja mitataan käyttämällä puhtaustestikaappia.

Työssä käsitellään aluksi komponenttien puhtausmittauksen suoritustapa (standardi ISO 16232), jonka jälkeen kerrotaan laboratoriossa tehtyjen mittausten suoritus tutkituille komponenteille. Analysoitujen tulosten perusteella esitetään näkemyksiä mitattujen komponenttien puhtaudesta sekä pohditaan havaittujen epäpuhtaushiukkasten alkuperää.

2. HYDRAULIKOMPONENTTIEN TEKNINEN PUHTAUS

Hiukasmaiset epäpuhtaudet ovat merkittävänä osatekijänä vaikuttamassa hydraulijärjestelmän käyttöikään ja vikaantumisherkkyyteen. Uuteen järjestelmään pääsee hiukasia sen sisältämistä komponenteista, jotka ovat peräisin niiden valmistusprosessin yhteydestä. Lisäksi epäpuhtaushiukasia syntyy komponenttien pakkaus- kuljetus- ja asennusvaiheessa. Nämä hiukkaset ovat alkuepäpuhtautena järjestelmässä ennen sen käyttöönottoa, jonka johdosta ovat monet komponentit vaarassa kulua haitallisesti tai rikkoontua ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä. Tällöin suodattimet eivät ole vielä kyenneet vähentämään hydraulinesteen hiukkasmäärää normaalitasolle. Herkimpiä ovat servoventtiilit, jotka saattavat jumiutua normaalia suurempien hiukkasten vuoksi, esimerkiksi suoritettaessa sisäänajoa. Nämä ongelmat aiheuttavat turhia kustannuksia ennen kuin järjestelmän käyttöikä on ehtinyt edes alkaa. Toisaalta vastaavanlainen tilanne voi tulla eteen myös huollon yhteydessä, jolloin asennetaan uusi komponentti vanhan tilalle. [1, s. v; 2, s. 373-376]

Hydraulijärjestelmän alkuepäpuhtauden selvittämiseksi on alettu tutkia järjestelmään asennettavien komponenttien puhtautta. Aikaisemmin tähän ei ole ollut selkeää esitystapaa, sillä puhtaustaso on esitetty öljyn puhtausstandardien ISO 4406 ja NAS 1638 mukaan. Nämä standardit eivät kerro mitään komponenttien puhtaudesta, vaan ainoastaan niissä kiertävän hydraulinesteen puhtaustasosta. Toimittaessa näiden mukaan, ei saada riittävää tietoa itse komponenttien puhtaudesta. Komponenttien puhtausstandardien puuttuessa ei ole myöskään osattu vaatia niiltä tiettyä puhtautta. [3, s. 2]

Ongelmaan on pyritty löytämään ratkaisu julkaisemalla autoteollisuuden nestejärjestelmiä koskeva standardi: ISO 16232 Maantieajoneuvot – Nestejärjestelmien komponenttien puhtaus (engl. Road vehicles – Cleanliness of components of fluid circuits). [4, s. 3] Verrattuna öljyn puhtausstandardeihin, ISO 16232 mukaan komponentin puhtaus ilmoitetaan useammassa differentiaalisessa kokoluokassa ($5 - 1000 \mu\text{m}$ ja $> 1000 \mu\text{m}$). Tämä esitystapa antaa tarkemman kuvan suurempien hiukkasten lukumäärästä. Samalla pyritään ilmoittamaan komponentin sisältämän suurimman hiukkasen koko. Standardi ISO 4406 ilmoittaa öljyn puhtauden vain hiukkaskokoluokille $\geq 4 \mu\text{m}_{(c)}$, $\geq 6 \mu\text{m}_{(c)}$ ja $\geq 14 \mu\text{m}_{(c)}$. [4, s. 18] Luvussa 2.2 esiteltävään ISO 16232 -standardiin pohjautuvat tässä diplomityössä suoritettavat mittaukset.

Edellä mainittua standardia on sovellettu lähinnä Saksassa, mutta myös Ruotsissa on viime aikoina julkaistu useampia komponenttien puhtausvalvontastandardeja. Esimer-

kiksi Scania ja Volvo Group käyttävät standardeja STD 4189 Epäpuhtauksien valvonta – Pinnan puhtaus järjestelmissä (julkaistu v. 2002), sekä STD 107-0002 – Komponenttien ja järjestelmien puhtaus – Testimenetelmät (julkaistu v. 2013). [5, s. 8]

2.1 Letku-Kompu – hydrauliiikan letkuasennelmien puhtauden kehitysprojekti

Letkujen osuus koko hydraulijärjestelmän märkätilavuudesta voi olla merkittävän suuri, etenkin paljon liikkuvia osia sisältävissä sovelluksissa. Täten TTY:n Hydrauliiikan ja automatiikan laitoksella on päätetty varsinaisen puhtausmittaustoiminnan alkuvaiheessa tutkia nimenomaan letkuasennelmia. Tätä projektia edeltäneet tutkimushankkeet (KompuNW ja Ely-Kompu) ovat pääasiassa keskittyneet luotettavien mittausmenetelmien ja testausympäristön kehittämiseen. [6, s. 13; 7, s. 1]

Tämä Letku-Kompu-projekti rahoitetaan pääosin tukisäätiön stipendillä, jonka lisäksi yhteistyössä ovat Tampereen ympäristössä toimivat hydrauliletkuasennelmia toimittavat yritykset. Projektin tavoitteena on kartoittaa yhteistyöyritysten tuottamien letkuasennelmien nykyinen puhtaustaso, jotta asiakkaina olevat yritykset voisivat tulevaisuudessa alkaa saada selvyyttä tilaamiensa letkuasennelmien puhtaudesta. Toinen keskeinen tavoite on tuoda julkisuuteen yleistä puhtausajattelutapaa. Tällöin kiinnitettäisiin jatkossa enemmän huomiota epäpuhtaushiukkasiin ja osattaisiin vaatia puhtaampia komponentteja eri teollisuuden toimialoilla.

2.2 Standardi ISO 16232 Maantieajoneuvot – Nestejärjestelmien komponenttien puhtaus

Standardi ISO 16232 on autoteollisuuden nestejärjestelmien komponenttien puhtautta koskeva standardi, joka on julkaistu vuonna 2007. Sitä sovelletaan kaikkiin ajoneuvoissa esiintyviin nestejärjestelmiin, joita ovat hydraulijärjestelmien lisäksi mm. jäähdytys- ja polttoainejärjestelmät. Standardi käsittelee komponenttien valmistusprosessista ja valmistusympäristöstä aiheutuvien epäpuhtauksien keräämistä ja analysointia. Tämä kymmenosainen standardi (taulukko 2.1) käsittelee pelkästään kiinteitä hiukkasmaisia epäpuhtauksia, jolloin huomioimatta jää vieraiden nesteiden tai kaasujen olemassaolo. [1, s. 1]

Taulukko 2.1. Standardin ISO 16232 osat. Perustuu lähteeseen [1]

Osa	Nimi	Sivumäärä
16232 - 1	Sanasto	15 s.
16232 - 2	Hiukkasten irrottaminen ravistelemalla	15 s.
16232 - 3	Hiukkasten irrottaminen painehuuhtelulla	15 s.
16232 - 4	Hiukkasten irrottaminen ultraäänellä	18 s.
16232 - 5	Hiukkasten irrottaminen testipenkin avulla	18 s.
16232 - 6	Hiukkasten massan laskenta gravimetrisellä analyysillä	10 s.
16232 - 7	Hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman selvittäminen mikroskoopilla	22 s.
16232 - 8	Hiukkastyypin selvittäminen mikroskoopin avulla	7 s.
16232 - 9	Hiukkasten lukumäärän ja kokojakauman selvittäminen automaattisella valonpeittoon perustuvalla hiukkaslaskurilla	18 s.
16232 - 10	Tulosten esittäminen	19 s.

Standardisarja käsittää neljä menetelmää epäpuhtaushiukkasten irrottamiseksi testikomponentista. [8, s. 7-8] Menetelmät ovat ravistelu, painehuuhtelu, ultraäänimenetelmä ja testipenkki. Yhteistä näille kaikille on se, että hiukkaset irrotetaan komponentista testinesteen avulla.

Ravistelumenetelmä perustuu komponentin ravistelemiseen, jolloin sen sisältämät epäpuhtaudet irtoavat liikkuvaan nesteeseen. Painehuuhtelussa komponenttia pestään paineistetulla testinesteellä hiukkasten irrottamiseksi. Ultraäänimenetelmä perustuu kavitoidun testinesteen irrotuskykyyn. Kun komponenttia ympäröivään testinesteeseen johdetaan ultraääntä, alkaa neste kavitoida. Tällöin nesteen sisältämät ilmakuplat litistyvät komponentin pintojen lähellä, aiheuttaen samalla hiukkasten irtoamista. Testipenkkimenetelmässä hiukkaset irrotetaan testinesteeseen kierrättämällä nestettä komponentin lävitse sopivalla tilavuusvirralla ja paineella.

Komponentista irrotetut hiukkaset sisältävä testineste analysoidaan standardin mukaan joko gravimetrisesti, mikroskoopilla tai automaattisella hiukkaslaskurilla (APC). Gravimetrisessä analyysissä testineste suodatetaan kalvosuodattimella, jonka jälkeen kuivattu suodatin hiukkasineen punnitaan. Vertaamalla tätä tulosta puhtaan suodattimen massaansa, saadaan selville epäpuhtaushiukkasten kokonaismassa.

Mikroskooppianalyysillä voidaan selvittää hiukkasten lukumäärä ja kokojakauma tutkimalla testinesteen suodattanut kalvosuodatin. Tämä voidaan tehdä joko automaattisesti tai manuaalisesti. Hiukkasten alkuperä on myös mahdollista tutkia, jos käytössä on soveltuva laitteisto.

Hiukkasten kokojakauman ja lukumäärän selvittäminen voidaan toteuttaa myös automaattisen hiukkaslaskurin avulla. Laskuri tunnistaa hiukkaset sen läpi virtaavasta nesteestä valoanturin avulla, jonka jälkeen se määrittelee hiukkaset projektiopinta-alaan

perustuen ja ilmoittaa niiden lukumäärät kokoluokittain. Analysointimenetelmien havainnointieroista johtuen eri menetelmillä saadut tulokset eivät ole vertailukelpoisia keskenään. Esimerkiksi hiukkaslaskuri ilmoittaa tunnistamansa kuitumaisen hiukkasen todellista pienempänä, mikä vääristää laskettuja hiukkaslukumääriä lopputuloksia ilmoitettaessa.

Standardissa ISO 18413 on esitetty ohjeet sopivan irrotusmenetelmän valintaan eri komponenteille. Taulukon 2.2 mukaan testipenkkimenetelmä on letkuille suositeltava vaihtoehto, kun taas komponenttien osille suositellaan painehuuhtelua. Ontoille soviteosille, kun esimerkiksi liittimille, on painehuuhtelu niin ikään suositeltava vaihtoehto.

Taulukko 2.2. *Epäpuhtauksien keräämismenetelmän valinta. [9, s. 9]*

Osa tai Komponentti	Epäpuhtauksien keräämismenetelmä			
	Ravistelu	Painehuuhtelu	Ultraäänipesu	Loppukäytön simulointi (testipenkki)
Putket ja letkut	Suosittelava	Hyväksyttävä	Hyväksyttävä	Suosittelava
Komponentin osat, tiivistimet	Hyväksyttävä	Suosittelava	Suosittelava	Ei käyttökelpoinen
Soviteosat	Hyväksyttävä	Suosittelava	Hyväksyttävä	Hyväksyttävä

Seuraavaksi käsitellään tarkemmin ISO 16232-standardin ne osat, jotka ovat keskeisiä tähän diplomityöhön liittyvissä puhtausmittauksissa.

2.2.1 Järjestelmän nollapuhtauskoe [3, s. 6-8; 10, s. 3-4]

Ennen varsinaisia komponenteille suoritettavia mittauksia, tehdään testijärjestelmälle nollapuhtauskoe. Tällä menetelmällä pystytään todentamaan, etteivät irrotusprosessin toimintaolosuhteet, laitteisto ja tuotteet vaikuta merkittävästi mitattavan komponentin puhtaustasoon.

Nollapuhtauskokeessa käytetään identtistä prosessia kuin komponentin testauksessakin. Testausolosuhteet ja käytettävät parametrit ovat oltava identtisiä normaaliin testaukseen verrattuna. Mittaustulosten varmistamiseksi, nollapuhtauskoe tulee suorittaa säännöllisin väliajoin. Järjestelmän nollapuhtautaso saadaan selville analysoimalla nollapuhtauskokeesta saadut näytteet.

Nollapuhtautaso koostuu epäpuhtauslähteiden yhdistelmistä. Näitä lähteitä ovat:

- Ympäristö (ilma, testaaja, työalue jne.)
- Testineste

- Testinesteen kanssa kosketuksiin joutuvat pinnat, jotka eivät ole mittauksen kohteena
- Kalvosuodatin tai automaattinen hiukkaslaskuri ja niihin liittyvät välineet
- Testinestenäytteiden valmistelu ja analysointi

Komponentin oletettu tai määritelty puhtaustaso sekä analysointimenetelmä vaikuttavat hyväksyttävään nollapuhtaustasoon. Gravimetristä analyysia käytettäessä, nollapuhtaustason tulee olla enintään 10 % tutkittavan komponentin oletetusta gravimetrisestä puhtaustasosta. Hiukkasten lukumäärää ja kokojakaamaa analysoitaessa, nollapuhtaustason tulee täyttää kaksi ehtoa:

- Hiukkasten lukumäärän tulee olla alle 10 % oletetusta tai määritellystä hiukkasten lukumäärästä kullakin kokoalueella
- Suurimman hiukkasen koko ei saa ylittää seuraavaa alempaa kokoluokkaa, joka on puolet testikomponentin oletetusta tai määritellystä maksimihiukkaskokoosta

Esimerkiksi testikomponentille suurin sallittu hiukkaskoko on $X = 350 \mu\text{m}$.

$$X = 350 \mu\text{m} \rightarrow 350 \mu\text{m}/2 \rightarrow 175 \mu\text{m}$$

Hiukkaskoko $175 \mu\text{m}$ kuuluu ISO 16232 – 10 mukaan kokoluokkaan G, jolloin nollapuhtauskokeen suurimmat hiukkaset voivat esiintyä korkeintaan luokassa F. Tällöin nollapuhtauskokeen suurimmat hiukkaset voivat olla korkeintaan $150 \mu\text{m}$ kokoisia.

Selvitettäessä 10 % puhtaustasoa, pyöristetään hiukkasmäärät aina alaspäin. Esimerkiksi jos testinäytteestä on löydetty 28 hiukkasta, sallitaan nollapuhtausnäytteen hiukkas-
tasoksi

$$28 \text{ kpl}/10 = 2,8 \text{ kpl} \rightarrow 2 \text{ kpl}$$

Mikäli komponentille ei ole oletettua tai määriteltyä puhtaustasoa, käytetään nollapuhtaustasolle seuraavia vaatimuksia: Kokoluokassa $> 5 \mu\text{m}$ korkeintaan 4000 hiukkasta ja kokoluokassa $> 15 \mu\text{m}$ korkeintaan 500 hiukkasta. Suurin hiukkaskoko on $50 \mu\text{m}$.

Nollapuhtauskokeessa ei välttämättä kyetä täyttämään vaadittua 10 % puhtaustasoa. Tällöin tutkittavat komponentit ovat hyvin puhtaita. Ratkaisuna on lisätä mitattavien komponenttien lukumäärää, jolloin tutkittava hiukkaslukumäärä kasvaa. Jos testijärjestelmän nollapuhtaustaso kasvaa jatkuvasti, pääsee sinne epäpuhtauksia jotakin kautta. Luotettavien testitulosten aikaansaamiseksi on tämä epäpuhtauslähde poistettava.

2.2.2 Testiprosessin työvälineet [3, s. 2-3; 10, s. 4-5]

Testauksessa käytettävien työvälineiden ja työympäristön tulee täyttää nollapuhtaustason vaatimukset. Ne eivät saa vaikuttaa komponentin epäpuhtaushiukkasten lukumäärään ja kokojakaumaan.

Hiukkasten irrotuksessa käytettävän testinesteen pitää soveltua tutkittavan komponentin, lopullisen järjestelmän, testilaitteiston sekä muiden työvälineiden materiaaleille. Testinesteen viskositeetin tulee olla pieni ($\leq 5 \text{ mm}^2/\text{s}$). Suositeltavaa on, että testineste pystyy irrottamaan tai liuottamaan rasvaa ja öljyä tutkittavan komponentin pinnoilta.

Testattavaa komponenttia liikuteltaessa ja varastoitaessa, se tulisi laittaa suljettuun astiaan. Tällöin komponentin märkäpinta-ala ja märkätilavuus täytyy eristää, ettei epäpuhtauksia siirry astian pinnoilta ja ympäristöstä niihin. Astian on oltava kooltaan ja muodoiltaan sopiva sekä sen materiaalin on oltava yhteensopiva testinesteen kanssa. Lisäksi astian on täytettävä nollapuhtaustason vaatimukset.

Komponentista irrotetut hiukkaset sisältävä testineste otetaan talteen keräyslaitteistoon tai näytepulloihin. Nämä välineet tulee aina olla puhtaita ja suojattuina, ettei mittaustuloksiin tulisi virhettä. Keräyslaitteisto on saatava mahdollisimman tyhjäksi testinestestä. Suositeltavaa on käyttää kartiomaista pohjaa kyseisissä laitteissa. Näytepulloissa testinestettä voidaan tarvittaessa laimentaa ja kuljettaa analysoitavaksi.

2.2.3 Hiukkasten irrottaminen painehuuhtelulla

Painehuuhtelussa komponenttia huuhdellaan testinesteellä suuttimen läpi sopivalla paineella. Komponentin pinnoilla olevat epäpuhtaudet irtoavat paineistetun nesteen vaikutuksesta, jonka jälkeen testineste analysoidaan. Irrotusmenetelmä soveltuu hyvin komponenteille, joidenka kontrolloituihin pintoihin pääsee painesuihkulla hyvin käsiksi. [8, s. 10; 10, s. 1] Painehuuhtelun tehokkuuteen vaikuttavat seuraavat parametrit: huuhtelun paine ja tilavuusvirta, suihkun kulma ja etäisyys, suuttimen koko ja muoto, huuhtelun kesto, huuhtelujärjestys, sekä testinesteen tyyppi ja määrä [8, s. 10; 10, s. v ja 4].

Painehuuhteluprosessin alkuvalmistelut [10, s. 3-4]

Luotettavien tulosten aikaan saamiseksi, testiprosessi ei saa vaikuttaa komponentin puhtaustasoon. Samoin tutkimuksen muissa vaiheissa (varastointi, käsittely, siirtely) hiukkaslukumäärän ja -jakauman muuttuminen tutkittavassa komponentissa on estettävä.

Ensimmäiseksi valitaan testattavien komponenttien lukumäärä. Lukumäärään vaikuttaa komponenttien puhtaustaso. Jos yhden tutkittavan komponentin puhtaustaso on korkea, vaikuttaa testilaitteiston sisältämät epäpuhtaudet merkittävästi lopputulokseen. Lisäksi testikomponentille määritetään tulosten esittämistä varten märkätilavuus ja/tai märkäpinta-ala. Nämä arvot esitetään tutkimusdokumentissa.

Kun irrotusprosessin parametrit on päätetty, puhdistetaan testauksessa käytettävät työvälineet. Tämän jälkeen testauslaitteistolle tehdään nollapuhautuskoe. Varsinainen testaus aloitetaan, mikäli nollapuhautuskoe on täyttää annetut vaatimukset.

Komponentti valmistellaan testausta varten puhdistamalla kaikki pinnat, jotka eivät ole mittauksen kohteena. Kaikki kuljetuksen ja varastoinnin aikaiset tulpat ja suojat poistetaan, niin ettei hiukkasia kulkeudu tutkittaviin pintoihin. Jos komponentti sisältää nestettä, tyhjennetään se ja nesteen sisältämät hiukkaset analysoidaan. Komponentti voidaan tarvittaessa purkaa, jos se on tutkimuksen kannalta välttämätöntä. Purkamisen yhteydessä hiukkasten lukumäärä voi lisääntyä tai vähentyä, mikä on otettava huomioon tuloksia tarkasteltaessa.

Painehuuhteluprosessi [8, s. 11; 10, s. 4-5]

Painehuuhtelua varten testikomponentti asetetaan puhtaan keräyslaitteiston ylle. Suurien komponenttien käsittelyä ja liikuttelua varten voidaan käyttää apuna esimerkiksi kantohihnaa, tukikehikkoa tai väkipyörää.

Painehuuhtelulaite varustetaan sopivilla suuttimilla. Huuhtelupaine ja tilavuusvirta säädetään siten, että testinesteellä saadaan irrotettua hiukkaset tehokkaasti ilman komponentin vahingoittumista. Testikomponentin kaikki kontrolloidut pinnat huuhdellaan huolellisesti.

Huuhtelun päätyttyä johdetaan testineste analysointilaitteistolle. Käytetty keräyslaitteisto huuhdellaan ja neste kerätään talteen. Testineste analysoidaan jollakin ISO 16232 analysointimenetelmällä ja saatu tulos (S_1) merkitään tutkimusdokumenttiin.

Seuraavaksi tehdään irrotusprosessi samalle komponentille vielä kaksi kertaa. Saadut tulokset (S_2 ja S_3) kirjataan tutkimusdokumenttiin.

Irrotusprosessin tehokkuuden todentaminen [3, s. 5-6; 10, s. 7-8]

Kolmen irrotusprosessin jälkeen muodostetaan saaduista tuloksista hiukkasten kokonaislukumäärä $\sum S_i$. Jos viimeisen näytteen (S_3) tulos on korkeintaan 10 % summasta $\sum S_i$, on irrotusprosessin loppupiste saavutettu. Asia on esitetty yhtälössä (2.1).

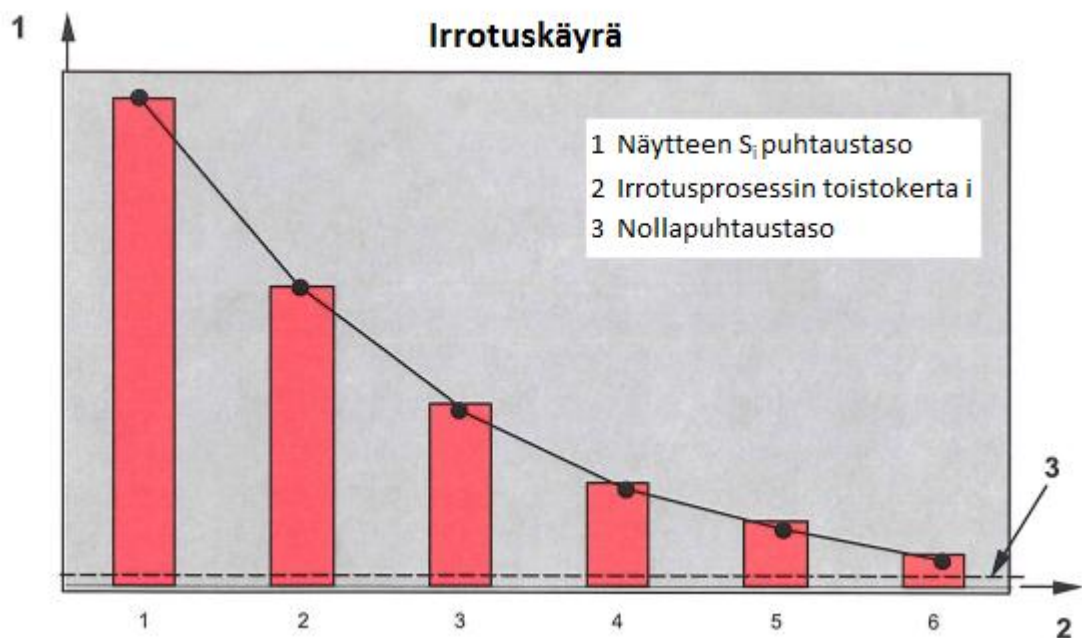
$$S_3 \leq 0,10 \sum_{i=1}^3 S_i \quad (2.1)$$

Mikäli kolmella toistokerralla ei päästä yhtälön (2.1) lopputulokseen, täytyy näytteitä kerätä enemmän toistamalla irrotusprosessia. Yhtälö (2.1) on esitetty yleisessä muodossa yhtälössä (2.2).

$$S_n \leq 0,10 \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.2)$$

Jos huuhtelukertoja tarvitaan enemmän kuin kuusi kappaletta, irrotusprosessi on todettava tehottomaksi. Tällöin on muutettava irrotusprosessin parametreja ja aloitettava koko testiprosessi alusta. Testaus muutetuilla parametreilla tehdään uudella testikomponentilla, joka on vastaavanlainen kuin edeltäjänsä. Jos muutosten jälkeenkään ei päästä vaadittuun lopputulokseen, täytyy kokeilla jotain toista standardin ISO 16232 irrotusmenetelmistä (ravistelu, painehuuhtelu, ultraääni).

Testikomponentin irrotuskäyrä (kuva 2.1) esittää puhtaustason kehittymistä huuhteluprosessin aikana.



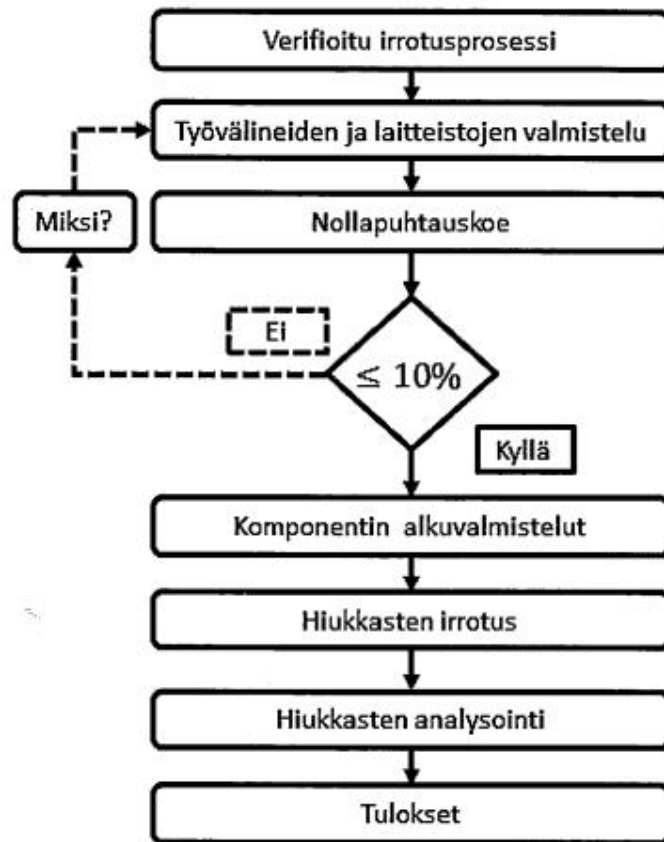
Kuva 2.1. Testikomponentin irrotuskäyrä. [10, s. 6]

Jos irrotusprosessin loppupiste saavutetaan, on järjestelmälle vielä suoritettava nollapuhtauskoe. Nollapuhtauskokeen ollessa sallituissa rajoissa, testipenkkiprosessi voidaan verifioida riittävän tehokkaaksi tavaksi irrottaa hiukkasia tutkittavasta komponentista. Tällöin menetelmä soveltuu kyseisen komponentin rutiinitestaukseen.

Komponenttien rutiinitestaus [7, s. 16; 10, s. 8]

Rutiinitestissä työvälineet valmistellaan ja nollapuhtauskoe suoritetaan todennetulla tavalla. Hiukkasten irrotus tehdään identtisiä toimintatapoja sekä verifioituja parametreja käyttäen ja irrotusprosessia toistetaan niin monta kertaa, kuin verifiointin yhteydessä on määritetty. Rutiinitestauksessa testinäytteitä ei ole välttämätöntä analysoida yksitellen, vaan kaikki huuhteluprosessissa tehdyt näytteet voidaan yhdistää ja analysoida ker-

ralla. Tällöin saadaan suoraan tulokseksi irrotuskäyrän sijasta komponentista irronnut kokonaishiukkaslukumäärä. Kuvassa 2.2 on esitetty kaavio rutiinitestaukseen kuuluvista työvaiheista.



Kuva 2.2. Kaaviokuva rutiinitestauksen eri työvaiheista. [7, s. 16]

Jos testataan identtisiä komponentteja samalla verifioidulla testimenetelmällä, voidaan kaikki komponentit testata yhtä aikaa. Samoin kuin yksittäisiä komponentteja mitattaessa, voidaan kaikki irrotukseen käytetty testineste yhdistää ja analysoida kerralla.

2.2.4 Hiukkasten irrottaminen testipenkissä

Testipenkillä pyritään jäljittelemään testattavalle komponentille sen todellisia käyttöolosuhteita. Testineste virtaa komponentin läpi joko paineistettuna tai alipaineistettuna. Nestevirtaus irrottaa epäpuhtaushiukkaset komponentin pinnoilta, jonka jälkeen hiukkaset sisältävä testineste kulkeutuu keräyslaitteistoon analysointia varten. [3, s. 2; 11, s. 13]

Testipenkkimenetelmä soveltuu hyvin komponenteille, joiden läpi testineste pääsee virtaamaan helposti. Mittausmenetelmän tehokkuuteen vaikuttavat ainakin seuraavat parametrit: Toistettavuus (virtausolosuhteet, kesto, virtaus) ja testinesteen viskositeetti. [3, s. 4; 11, s. 13]

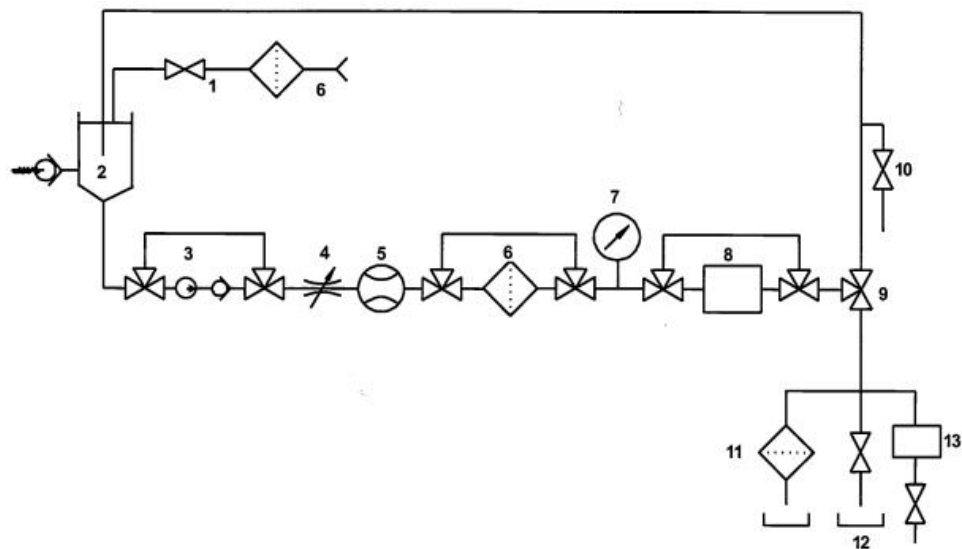
Testijärjestelmä [3, s. 2; 11, s. 13]

Testijärjestelmällä luodaan samankaltaiset olosuhteet (tilavuusvirta, lämpötila, paine), jossa tutkittava komponentti normaalisti toimii. Testiolosuhteiden tulisi vastata mahdollisimman hyvin todellisia käyttöolosuhteita. Testauksessa käytetyt parametrit tulee kirjata komponentin tutkimusdokumenttiin.

Testilaitteisto ei saa aiheuttaa muutoksia epäpuhtaushiukkasten lukumäärään ja kokoja-kaumaan. Järjestelmän komponentteihin ei saa kasaantua hiukkasia, joka vääristäisi lopputuloksia.

Testipenkkiprosessi [3, s. 11; 11, s. 13-15]

Kuvassa 2.3 on tyypillinen testilaitteistoratkaisu, jossa paineistettu testineste kiertää tutkittavan komponentin lävitse.



- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Paineilmälähteen sulkuventtiili | 8. Testikomponentti |
| 2. Testitankki | 9. 3-tieventtiili |
| 3. Pumppu | 10. Näytteenottoventtiili |
| 4. Säädettyvä kuristusventtiili | 11. Kalvosuodatin |
| 5. Virtausmittari | 12. Testinesteen keräysastia |
| 6. Puhdistussuodatin | 13. Automaattinen hiukkaslaskuri |
| 7. Painemittari | |

Kuva 2.3. Vaihtoehtoisen testilaitteiston hydraulikaavio. [11] s.11

Yllä olevan kuvan esimerkikikaavio on piirretty ISO 16232-standardiin virheellisesti siten, että pumpun jälkeinen vastaventtiili on väärinpäin. Lisäksi pumpun yhteyteen ei ole sijoitettu paineenrajoitusventtiiliä.

Ennen hiukkasten irrotusta tutkittavasta komponentista, on testipenkki puhdistettava. Puhdistuksen ajaksi testipenkkiin kiinnitetty komponentti (8) erotetaan muusta järjestelmästä ohitusventtiilien avulla. Testitankki (2) täytetään nesteellä. Pumppu (3) käynnistetään ja säädetään tilavuusvirta vaaditaksi kuristusventtiilin (4) avulla. Vaihtoehtona tilavuusvirran tuottamiseksi on paineistaa säiliö paineilmalla.

Kolmitieventtiili (9) on asennossa, jossa puhdistussuodattimelta (6) tuleva testineste ohjataan takaisin testitankkiin. Puhdistusta jatketaan niin kauan, kunnes näytteenottoventtiilin (10) kautta otettu testinäyte saavuttaa sille määritellyn tai oletetun nollapuhdistustason. Nollapuhdistusvaatimuksen puuttuessa, testinesteen tulee saavuttaa ISO 4406 mukainen -/12/9 puhtaustaso.

Testijärjestelmän puhdistuksen jälkeen suoritetaan hiukkasten irrotus komponentista, jolle on suoritettu luvussa 2.2.3 kerrotut alkuvalmistelut. Tilavuusvirta säädetään tutkittavan komponentin vaatimaan arvoon kuristusventtiilillä. Puhdistuksen ajaksi testikomponentin erottamisen tehneet 3-tieventtiilit käännetään niin, että testineste virtaa nyt komponentin läpi. Vastaavasti 3-tieventtiili (9) kytketään siten, että testineste virtaa suoraan kalvosuodattimelle (11), testinesteen keräysastialle (12) tai automaattiselle hiukkaslaskurille (13). Komponenttia huuhdellaan sillä nestemäärällä, joka on ennalta määriteltä. Tämän jälkeen 3-tieventtiili (9) käännetään niin, että testineste pääsee virtaamaan takaisin testitankkiin. Lopuksi pysäytetään pumppaus.

Testipenkkiprosessissa tulosten analysointi ja irrotusprosessin tehokkuuden todentaminen suoritetaan samalla tavalla kuin luvussa 2.2.3 esitetyn painehuuhteluprosessin tapauksessa.

2.2.5 Hiukkaskoon ja lukumäärän laskenta mikroskoopilla

Testinesteen sisältämät hiukkaset suodatetaan kalvosuodattimelle mikroskooppianalyysia varten. Standardin ISO 16232 mukaan hiukkaset voidaan analysoida joko valomikroskoopilla (LM) tai elektronimikroskoopilla (SEM). Tässä yhteydessä tutustutaan vain valomikroskooppiin, koska sellainen on käytössä tällä hetkellä IHA:n komponenttipuhdistuslaboratoriossa.

Suodatusprosessin työvälineet [3, s. 17; 12, s. 2-3]

Mittauksissa käytetään kalvosuodatinta, jonka suodatustarkkuus on 5 µm. Standardi ISO 16232 suosittelee suodattimen huokoskooksi 1/3:aa pienimmän tutkittavan hiukkasen halkaisijasta. Tähän tutkimukseen suodattimet soveltuvat, sillä tutkimuksen kohteena ovat yli 25 µm (D-luokka) kokoiset hiukkaset. Suodattimen valinnan yhteydessä on varmistuttava, että sen materiaali soveltuu käytettävälle testinesteelle.

Irrotusprosessissa käytetyn testinesteen suodatuksen jälkeen kalvosuodatin siirretään magnetoitumattomilla pihdeillä Petri-maljaan. Seuraavaksi kalvosuodattimeen kertynyt

neste höyrytetään pois käyttämällä lämpökaappia. Kuivatuksen jälkeen on Petri-maljan lämpötilan annettava tasaantua huoneenlämpöön, jottei mikroskoopin näytelasi höyrystyisi.

Analysointi valomikroskoopilla [6, s. 25-28; 12, s. 10-12]

Analyysi aloitetaan asettamalla kalvosuodatin mikroskoopin näytepöydälle. Aluksi tarkistetaan silmämääräisesti epäpuhtaushiukkasten tasainen jakautuminen suodattimelle. Hiukkaset eivät saa olla päällekkäin. Mikäli näin käy, on käytettävä suurempaa suodattimen halkaisijaa tai useampaa suodatinta.

Mikroskoopin näytepöydälle sijoitettu suodatin suurennetaan optisesti. Mikroskooppiin kuuluu yhtenä osana digitaalikamera, jolla suodattimen pinta-ala kuvataan. Kalvosuodatin liikkuu motorisoidulla alustalla niin, sen jokainen kohta tulee kuvatuksi. Saadut kuvat liitetään toisiinsa mikroskoopin kuvaohjelmalla.

Tällöin tulee varmistua, että suodattimen koko tehollinen pinta-ala analysoidaan ja kaikki hiukkaset tulee lasketuksi. Lisäksi täytyy huolehtia, että kuva-analyysiohjelmisto osaa liittää yksittäiset kuvat saumattomasti toisiinsa.

Seuraavaksi saatu kuva suodattimesta muutetaan musta-valkoiseksi. Valomikroskoopilla musta vastaa valoisuuden pienintä arvoa ja vastaavasti valkoinen valoisuuden suurinta arvoa. Normaalisti valoisuus jaetaan 256 eri asteeseen. Valaistuksen intensiteetti kasvatetaan sellaiseksi, että kuvan vaaleimmat pisteet saavuttavat maksimitason. Määrittämällä harmaasävyyn kynnyisarvo, saadaan se kohta, jota tummemman pisteet luokitellaan hiukkasiksi. Vastaavasti tätä kynnyisarvoa vaaleammat pisteet tulkitaan suodattimen pinnaksi. Tulosten oikeellisuuden takaamiseksi, tulee harmaasävyyn kynnyisarvo määrittää erikseen jokaiselle suodattimelle.

Näiden toimenpiteiden jälkeen kuva-analyysiohjelmisto määrittää kalvosuodattimen pinnalla esiintyvien hiukkasten dimensiot ja niiden lukumäärän kokoluokittain. Lisäksi ohjelmisto ilmoittaa hiukkasten suurimman mitan.

2.2.6 Tulosten esittäminen [3, s. 31-34; 13, s. 2-7]

Analysoinnin tulokset voidaan ilmoittaa kolmella eri tapaa: testikomponenttia, testikomponentin 1000 cm^2 märkäpinta-alaa tai testikomponentin 100 cm^3 märkätilavuutta kohden. Testikomponenttien mittayksiköiden ollessa samat, voidaan tuloksia vertailla eri komponenttien kesken.

Sitä vastoin vertailua ei voida suorittaa tuloksilla, jotka on ilmoitettu komponenttia kohden. Tässä yhteydessä mittayksikkö ei sisällä tietoa komponentin mitoista. Sitä tuleekin käyttää ainoastaan silloin, kun tutkitaan täyttääkö komponentti sille asetetut puhdistusvaatimukset.

Testikomponentin tyypistä riippuen tulosten esittämiseen käytetään joko märkätilavuutta tai märkäpinta-alaa. Tulosten esitystapana käytetään märkätilavuutta, jos tukittavassa komponentissa tai kokoonpanossa neste pääsee kiertämään sen ontossa rakenteessa. Sitä vastoin kiinteille komponenteille tulosten sopiva ilmoitustapa on märkäpinta-alaa kohden. Jos testattavan komponentin märkätilavuutta ei tiedetä, tulokset voidaan esittää märkäpinta-alaa kohden.

Komponentin puhtauskoodi (CCC-koodi)

Tutkittavasta komponentista irrotetut hiukkaset jaetaan kokoluokkiin, jotka on esitetty taulukossa 2.3. Kutakin kokoluokkaa vastaa tietty kirjain välillä B-K.

Taulukko 2.3. Standardin ISO 16232 mukaiset hiukkaskokoluokat. [13, s.4]

Kokoluokka	Hiukkaskoko x [μm]
B	$5 \leq x < 15$
C	$15 \leq x < 25$
D	$25 \leq x < 50$
E	$50 \leq x < 100$
F	$100 \leq x < 150$
G	$150 \leq x < 200$
H	$200 \leq x < 400$
I	$400 \leq x < 600$
J	$600 \leq x < 1000$
K	$1000 \leq x$

Komponentin puhtauskoodissa puhtausluokka ilmoittaa hiukkaslukumäärän kussakin kokoluokassa. Hiukkaslukumäärää vastaavat puhtausluokat on esitetty taulukossa 2.4.

Taulukko 2.4. Standardin ISO 16232 mukaiset puhtausluokat. [13, s.4]

Hiukkasten lukumäärä y suhteutettuna 100 cm ³ märkätilavuuteen tai 1000 cm ² märkäpinta-alaan		Puhtaus- luokka
Alaraja < y ≤ Yläraja		
Alaraja	Yläraja	
0	0	00
0	1	0
1	2	1
2	4	2
4	8	3
8	16	4
16	32	5
32	64	6
64	130	7
130	250	8
250	500	9
500	1000	10
1000	2000	11

Hiukkasten lukumäärä y suhteutettuna 100 cm ³ märkätilavuuteen tai 1000 cm ² märkäpinta-alaan		Puhtaus- luokka
Alaraja < y ≤ Yläraja		
Alaraja	Yläraja	
2000	4000	12
4000	8000	13
8000	16000	14
16000	32000	15
32000	64000	16
64000	130000	17
130 x 10 ³	250 x 10 ³	18
250 x 10 ³	500 x 10 ³	19
500 x 10 ³	1 x 10 ⁶	20
1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶	21
2 x 10 ⁶	4 x 10 ⁶	22
4 x 10 ⁶	8 x 10 ⁶	23
8 x 10 ⁶	16 x 10 ⁶	24

Taulukossa 2.4 hiukkaslukumäärät on esitetty suhteessa 1000 cm² märkäpinta-alaan tai 100 cm³ märkätilavuuteen. Komponentin puhtaustason ilmoittamiseksi mittauksista saatavat tulokset täytyy kertoa suhteella 1000 cm² / A_C tai 100 cm³ / V_C. Useampaa kuin yhtä komponenttia testattaessa, täytyy komponenttien lukumäärä myös huomioida tuloksia ilmoitettaessa. Puhtausluokka 00 tarkoittaa sitä, ettei kyseisen kokoluokan hiukasia ole esiintynyt yhtään.

Komponentin puhtauskoodi voidaan ilmoittaa, kun hiukkasten kokojakauma ja lukumäärä on saatu selville. Esitettävä CCC-koodi alkaa joko V-, A- tai N-tunnuksella. V-tunnus esittää komponentin puhtautta 100 cm³ märkätilavuutta kohti ja A-tunnus 1000 cm² märkäpinta-alaa kohti. Hiukkasten määrä komponenttia kohden ilmoitetaan N-tunnuksella. Komponentin puhtauskoodi voi olla esimerkiksi:

$$CCC = V (B20 / C16 / D18 / E12 / F12 / G12 / H8 / I1 / J1 / K00)$$

Jos useilla kokoluokilla on sama puhtaustaso, voidaan edellistä esimerkkiä lyhentää seuraavasti.

$$CCC = V (B20 / C16 / D18 / EFG12 / H8 / IJ1 / K00)$$

Puhtauskoodia ei tarvitse ilmoittaa kaikilla kokoluokilla, jos kyseiset kokoluokat eivät ole oleellisia komponentilla tai analysoinnissa ei löytynyt hiukkasia kyseisillä kokoluokilla. Seuraavassa on esimerkki kyseisestä tapauksesta.

$$CCC = V (C16 / D18 / E12 / F8 / J0)$$

Puhtauskoodissa voidaan myös viitata laajempaan kokoluokkaan. Alla olevassa esimerkissä koodi tarkoittaa, että kokoluokalla $150 \mu m \leq x < 1000 \mu m$ on puhtaustaso 20 ja muut eivät ole oleellisia tai niissä ei ole löytynyt hiukkasia.

$$CCC = V (G - J20)$$

Ilmoitettaessa puhtauskoodia komponenttia kohti, käytetään CCC-koodissa tunnusta N. Tällöin ei ilmoiteta taulukon 2.4 mukaista puhtaustasoa, vaan kokoluokan yhteydessä esitetään pyöristettynä hiukkasten lukumäärä. Esimerkki kyseisestä tilanteesta:

$$CCC = N (B 585600 / C 58200 / D 18500 / E 3600 / F 2800 / H 190 / I 4 / J 0)$$

Komponenttikohtainen puhtauskoodi $CCC = N (G - K50)$ tarkoittaa, että kokoalueella $\geq 150 \mu m$ (G-K) on korkeintaan 50 hiukkasta komponenttia kohti.

3. LETKUASENNELMIEN VALMISTUS JA HANKINTA

Letkuasennelma koostuu letkumateriaalista ja sen päihin asennettavista liittimistä. Molempien komponenttien ominaisuudet on määritelty useissa eri standardeissa. Puhtaus- tutkimusta varten letkuasennelmat teetettiin kahdessa niitä valmistavissa yritysissä.

3.1 Letkustandardit

Hydrauliletkujen ominaisuuksia käsitteleviä standardeja on useita. Letkuja on määritelty niin DIN-, EN-, ISO kuin SAE-standardeissa. Yleisin käytössä oleva standardi on SAE J517, jossa letkut on ryhmitelty rakenteen, paineenkeston ja käyttötarkoituksen perusteella 18 ryhmään SAE 100R1-18. Taulukossa 3.1 on esitetty letkuja koskevat standardit ja niiden vastaavuudet.

Hydrauliletkun koko ilmoitetaan aina sisähalkaisijan perusteella, pois lukien letkutyyppit SAE 100R5 ja SAE 100R14. Näissä koko ilmaisee ulkohalkaisijaa. Esitettäessä letkukokoa SAE-standardin mukaan perustuu tunnusluku tuuman kuudestoistajakoon (dash size), kun taas esimerkiksi DIN-standardi ilmaisee letkun nimellissuuruuden, joka on likimain sen sisähalkaisija millimetreinä. Tällöin letkukoko, joka SAE merkinnällä on 12 (3/4 tuumaa eli 19 mm), on DIN kokona 20.

Valmistajan pitää merkitä letkun tunnistetiedot letkuun vähintään 60 cm välein. Pakollisiin merkintöihin kuuluvat letkun valmistaja, valmistusajankohta sekä tyyppi ja koko.

Taulukko 3.1. *Hydraulijärjestelmissä käytettävät letkutyyppit. [14, s. 39]*

Letkutyyppi	Vahviketyyppi	Eurooppa	Amerikka	Kansainvälinen
Matalapaineletkut	Tekstiilikudos	EN 854-1TE		ISO 4079-1
		EN 854-2TE		ISO 4079-1
		EN 854-3TE		ISO 4079-1
		EN 854-R3	SAE 100R3	ISO 4079-1
			SAE 100R5	
		EN 854-R6	SAE 100R6	ISO 4079-1
Keskipaineletkut	Teräskudos	EN 853-1ST	SAE 100R1A	ISO 1436-1
		EN 853-1SN	SAE 100R1AT	ISO 1436-1
		EN 853-2ST	SAE 100R2A	ISO 1436-1
		EN 853-2SN	SAE 100R2AT	ISO 1436-1
		EN 857-2SC		ISO 11237-1
		EN 857-1SC		ISO 11237-1
			SAE 100R16	
			SAE 100R17	
Korkeapaineletkut	Terässpiraali	EN 856-4SP	SAE 100R10	ISO 3862-1
		EN 856-4SH		ISO 3862-1
			SAE 100R9	ISO 3862-1
			SAE 100R11	ISO 3862-1
		EN 856-R12	SAE 100R12	ISO 3862-1
		EN 856-R13	SAE 100R13	ISO 3862-1
		EN 856-R15	SAE 100R15	ISO 3862-1
Imuletku	Tekstiilikudos + terässpiraali		SAE 100R4	
Termoplastiset letkut	Polyesterikudos	EN 855-R7	SAE 100R7	
		EN 855-R8	SAE 100R8	
Teflonletku (PTFE)	Ruostumaton teräskudos		SAE 100R14	

Taulukosta 3.1 nähdään, ettei kaikille SAE-standardin letkutyypeille ole vastaavaa EN- tai ISO-standardia. Esimerkiksi imuletku (SAE 100R4) on määritelty vain SAE-standardissa.

3.2 Tutkittavien letkuasennelmien hankinta

Mittausten aloittamiseksi ensimmäinen tehtävä oli hankkia letkuasennelmat molemmista asiakasyrityksistä. Letkuasennelmat tilattiin yritysten normaalien käytäntöjen mukai-

sesti tekeytymällä heidän asiakkaakseen, jolloin varmistettiin se, ettei tuotantolinjalla osattu ennakoida tulevia puhtaustutkimuksia.

Kuvassa 3.1 on eräs tutkimuksessa käytetty letkuasennelma.



Kuva 3.1. Mittauksissa käytetty letkuasennelma.

Mitattavan letkuasennelman koko ja liitintyyppi valittiin siten, että se olisi yleisesti käytössä oleva kokoonpano sekä helposti liitettävissä puhtaustulostuslaitteistoihin. Asennelman pituutta määrittäessä huomion arvoista on, että pitkässä letkuasennelmassa letkumateriaalin osuus on suuri verrattuna liittimiin. Tällöin letku sisältää verrattain paljon epäpuhtauksia suhteessa liittimiin ja asennustyön tuottamaan epäpuhtaushiukkasiin.

Taulukossa 3.2 on esitetty mittauksen kohteena olevan letkuasennelman tekniset tiedot.

Taulukko 3.2. Valitun letkuasennelman tekniset tiedot.

Letkutyyppi ja -standardi	2-kudosletku, EN 857-2SC
Letkukoko	3/8"
L-mitta	1000 mm
Liittimet	suora, DIN, s-sarja

Molemmissa tapauksissa letkuasennelmien valmistusprosessia seurattiin paikan päällä. Täten saatiin selville kyseisen yrityksen tapaa tuottaa valmis asennelma. Tapahtuman aikana tehtiin eri havaintoja valmistukseen ja työympäristöön liittyen, joita oli tarkoitus hyödyntää mittaustuloksia analysoitaessa. Valmiit letkuasennelmat kuljetettiin IHA:n laboratorioon kannellisissa muovilaatikoissa siten, että ne olivat nipussa ja taitettuina.

3.3 Letkuasennelmien valmistus

Letkumateriaalin valmistava alihankkija toimittaa letkut kiepeissä asennelmia valmistavalle yritykselle. Samoin liittimet ja suojatulpat ovat jonkin alihankkijan toimittamia.

Letkuasennelman valmistus aloitetaan asettamalla katkaisupöydällä oleva ohjain siten, että katkaistava letku saadaan halutun mittaiseksi. Letkua vedetään kelalta katkaisupöydälle ohjainta vasten ja suoritetaan katkaisu. Leikkurissa on pyörivä terä, jolla letkumateriaali katkaistaan. Letkussa entuudestaan olevien ja katkaisun aikana syntyneet epäpuhtaushiukkaset poistetaan letkusta tavallisesti ampumalla vaahtomuovitulppa paineilamalla letkun läpi. Sisäseinämiä vasten tiivistyvä tulppa kuljettaa mukanaan suurimman osan letkuun jääneistä hiukkasista.

Seuraavana on vuorossa valittujen liittimen asennus. Koska kyseessä on melko pieniläpimittainen letkukoko, ei sitä tarvitse kuoria liittimien asennusta varten. Liittimet voidellaan öljyllä letkuun työntämisen helpottamiseksi, jonka jälkeen ne asennetaan letkun päihin. Tämä työvaihe voidaan tehdä joko käsin käyttäen tarvittaessa jotain vastinpintaa apuna tai koneellisesti, jolloin liitin työnnetään letkuun puristimen avulla. Liittimen ulkoolkki puristetaan kiinni letkumateriaaliin tähän työhön tarkoitettulla koneella. Puristuskoneen säteittäiset leuat painavat ulkoolkin kiinni letkumateriaaliin.

Seuraavaksi valmis asennelma tulpataan, ettei sen märkäpinnoille pääse kertymään lisää epäpuhtauksia. Tulppina voidaan käyttää joko tavallisia muovitulppia tai kutistettavia suojia, jotka vedetään tiukasti liittimen pään ympärille. Tämän jälkeen tarkistetaan, että liittimet on asennettu oikeaan asentoon ja syvyyteen. Ulkoolkin kunnollinen puristuminen varmistetaan mittaamalla sen ympäriltä puristusmitta ja vertaamalla saatua tulosta ohjearvoon. Lopuksi valmiit letkuasennelmat niputetaan ja toimitetaan kokoonpanolinjalta eteenpäin.

Taulukkoon 3.3 on koottu kummankin letkuvalmistajan käyttämät työvaiheet letkuasennelman valmistuksessa.

Taulukko 3.3. *Letkuasennelman valmistuksen eri työvaiheiden vertailu*

Työvaihe	Valmistaja A	Valmistaja B
1. Letkun katkaisu kelalta	X	X
2. Letkunpäiden harjaus	X	
3. Puhdistustulpan puhallus	X	
4. Liittimien voitelu	X	X
5. Liittimien asennus letkuun	X	X
6. Liittimien puristaminen	X	X
7. Letkuasennelman tulppaus	X	

Oheisesta taulukosta käy ilmi, että valmistajan A tuotantomenetelmä käsittää seitsemän työvaihetta letkuasennelman valmistamiseksi. Vastaavasti valmistajan B tuottama letkuasennelma on tehty neljällä työvaiheella.

3.4 Valmistusprosessiin liittyvät epäpuhtauslähteet

Valmistusprosessin aikaisia epäpuhtauslähteitä voidaan kuvata jakamalla tuotantoprosessi neljään eri kohteeseen. Nämä osa-alueet ovat logistiikka, asennustyö, ympäristö ja henkilökunta. Taulukossa 3.4 on esitetty niitä tekijöitä, ovat keskeisiä epäpuhtauksien synnyn osalta. [15, s. 20]

Taulukko 3.4. *Epäpuhtauksien syntyyn vaikuttavia tekijöitä. [15, s. 20]*

Kokoonpanotyö ja -olosuhteet Suunnittelu Työvälineet Liitostavat Puhdistustyö Työvaiheet	Ympäristö Asennustilan pohjapiirros Puhdastilat Lattiat, seinät, sisäkatot Ilmanvaihto, Ilmastointi Kulkutiet
Logistiikka Paketointi Kuljetukset, siirrot Pakkausten purku Varastointi	Henkilöstö Käyttäytymissäännöt Koulutus, pätevydet Vaatetus Käsittely Työympäristön puhtaanapito

Edellä kuvatun taulukon sisältö ei pelkästään rajoitu yhden yrityksen sisälle, vaan sillä voidaan kuvata kaikkia valmistusprosessissa mukana olevia yrityksiä. Logistiikka –osio kykenee liittämään eri paikat ja yritykset toisiinsa, jolloin tarkastelu voidaan tehdä käsittämään koko tuotteen valmistusketju. Tosin tässä projektissa keskityttiin havainnoimaan taulukossa 3.4 kuvattuja asioita vain letkuasennelman kokoonpanoon liittyen.

Puhtaushavainnot yrityksissä

Letkuvalmistajan käytännöistä riippuen varastoidaan päistään avoinna olevat letkukelat yleensä lattiatasolla, joko pahvilaatikoissa tai suoraan kuormalavan päällä. Liittimiä voidaan varastoida hyllyissä joko avonaisissa tai suljetuissa laatikoissa. Lisäksi ne voivat olla laatikoissaan täysin sekaisin tai yksittäispakattuina niin, etteivät ne pääse koskettamaan toisiaan. Jälkimmäistä tapaa puolustaa se, etteivät liittimet pääse tällöin irrottamaan hiukkasia toisistaan hankaamalla.

Letkun katkaisu on valmistusprosessin puhtauden kannalta haitallisin työvaihe. Suuriläpimittaisia letkuja katkaistaessa on yleensä käytettävä hammastettua terää, jolloin irtoaa

enemmän materiaalia letkusta. Letkun läpi ammuttavat vaahtomuovitulpat ovat herkkiä keräämään itseensä epäpuhtauksia, etenkin jos niitä säilytetään avoimesti. Tällöin tulppa voi olla jo huomattavan likainen ennen letkun läpi puhaltamista. Samoin valmiin letku-asennelman tulppaamisessa käytettävien suojatulpat voivat sisältää huolimattoman käsittelyn johdosta haitallista epäpuhtautta. Ainakin kutistettavat suojat voidaan varastoida sisäkkäin, jolloin ne pysyvät hyvin suojattuina asennukseen asti.

Asennusympäristöön liittyvissä havainnoissa kiinnitettiin huomiota muun muassa lattiaan, työtasoihin, työvälineisiin ja tilan muihin työstökoneisiin. Rikkinäinen tai puutteellinen betonilattian pinnoitus yhdessä lattialla olevien ylimääräisten esineiden kanssa edesauttavat lattiatason epäpuhtaisuutta. Samoin työtasojen päällä säilytettävät työkalut keräävät epäpuhtauksia huomattavasti ja vaikeuttavat siisteyden ylläpitämistä. Myös työtasojen materiaaleissa oli eroja, sillä asennustoimenpiteitä saatettiin tehdä jopa puusen pölkyn päällä. Letkun puhdistuksessa käytettävän paineilman suodatuksella voi olla vaikutusta letkuun jäävään hiukkaslukumäärään, mutta paineilman likaisuutta oli vaikea havaita työskentelyn aikana.

Asennushenkilökunnan toimintaa tarkkailtaessa huomio kiinnittyi käytettyjen työvaatteiden ja käsineiden lisäksi letkuasennelman valmistuksessa käytettävien työvälineiden käsittelyyn. Samoilla työhanskoilla on saatettu tehdä edellisellä työpisteellä jotain huomattavasti likaisempaa työtä, jolloin etenkin liittimiä käsiteltäessä voi merkittävä määrä epäpuhtaushiukkasia päästä letkuasennelmaan.

4. LETKUASENNELMIEN MITTAUS

Puhtausmittauksia tehtiin saman valmistesarjan komponenteille sekä Hydac:in puhtaus-testikaapilla että omavalmisteisella puhtausmittauslaitteistolla. Tällöin saatiin mahdollisuus vertailla tuloksien yhtenevääisyyttä.

4.1 Mittaukset Hydac CTU 1230 puhtaustestikaapilla

Tutkimuksen ensimmäiset letkumittaukset suoritettiin Hydac:in puhtaustestikaapilla. Vaikka kyseessä on etupäässä painehuuhtelumenetelmää käyttävä testilaitteisto, on siinä mahdollisuus toteuttaa mittaukset myös testipenkkimenetelmällä. Tutkimusprojektin ensimmäisten mittausten suorittamista Hydac puhtaustestikaapilla puolsi se, että kyseisestä laitteistosta IHA:lle on kertynyt eniten käyttökokemusta. Lisäksi se on suhteellisen helppokäyttöinen.

4.1.1 Kaapin rakenne ja toiminta

Hydac CTU 1230 (Contamination Test Unit) on pyörillä varustettu pesukaappi (kuva 4.1). Se käsittää tiiviin puhdastilan, jossa tutkittavasta komponentista hiukkaset irrote-taan painehuuhtelulla. Tilan yläosassa on avattava muovikansi, jonka kautta komponentit siirretään puhdastilaan. Huuhtelua varten on käytettävissä kaksi käsin liikuteltavaa suutinta, joita käsitellään etuseinään kiinteästi asennettujen kumihanskojen avulla. Kolmas, kiinteä suutin on tarkoitettu puhdastilan pesuun. Huuhtelujen tarvitsema testinesteen virtaus tuotetaan paineilmalla paineistamalla toinen testinesteen varastosäili-öistä.



Kuva 4.1. Hydac CTU 1200 puhtaustestikaappi.

Hydac CTU 1230:n käyttöliittymänä on PC, jonka näyttö on sijoitettu kaapin päälle. Huuhtelusuuttimia hallintaan päälle/pois – toimisella jalkapolkimella. Laitteisto tarvitsee 1-vaiheverkkovirran lisäksi paineilman syötön (60 l/min, max. 6 bar, suodatusaste max. 5 μ m), jonka sisältämän ilman on oltava vedetöntä ja öljytöntä. Irrotusnesteen suodatusta varten laitteistossa on 3 μ m:n paine- ja paluusuodattimet.

Testipenkkimenetelmää käytettäessä tutkittava komponentti kytketään kaapin puhdastilan seinässä oleviin liitäntöihin. Johtamalla paineinen testineste mitattavan letkuasennelman ylemmän liitäntään, saadaan hiukkasia irrottava läpivirtaus aikaiseksi. Testineste virtaa letkuasennelmasta puhdastilaan, jossa se valuu altaan pohjalle. Sieltä neste imetään alipaineen avulla kalvosuodattimen läpi, joka pidikkeineen sijaitsee kaapin etuseinällä. Käytetty irrotusneste kulkee toiseen varastosäiliöön, josta se johdetaan uudelleen huuhtelukiertoon syöttösäiliön tyhjentyessä. Syöttö- ja paluusäiliöiden vaihto tapahtuu kääntämällä säiliöiden paineistus päinvastaiseksi sekä ohjaamalla neste venttiilin avulla oikeisiin suuntiin.

4.1.2 Alkuvalmistelut

Ennen varsinaisten mittausten aloittamista, suoritettiin harjoitusmittaussarja vastaavalla letkuasennelmalla. Tämä kyseinen komponentti oli ollut tutkittavana jo aikaisemmin, joten sen puhtaustason voitiin olettaa verrattain korkeaksi. Ensisijainen tavoite harjoitussarjalla oli perehdyttää mittaaja laitteiston ominaisuuksiin ja tehokkaisiin työrutiineihin. Etenkin jokaisen näytteen päätteeksi tapahtuva roiskealueiden huuhtelu olisi suotavaa tehdä aina samalla tavalla, jotta saadut tulokset olisivat mahdollisimman johdonmukaiset. Lisäksi kalvosuodattimen oikeaoppinen ja sujuva vaihtotyöskentely näytteiden välillä vähentää työn suorittajan tuomaa virhettä lopputuloksiin, sillä avoimelle kalvosuodattimelle kulkeutuu helposti kuituja esimerkiksi vaatteista.

Toiseksi harjoitussarjan tehtävänä oli puhdistaa soviteliittimet, jotka jouduttiin asentamaan testikaapin liitäntöihin letkumittauksia varten. Liittimet huuhtoutuivat mittauksen aikana, jolloin niissä olleet epäpuhtaudet eivät päässeet merkittävästi vaikuttamaan varsinaisten mittausten tuloksiin. Lisäksi jo tutkitun, puhtaaksi huuhdotun letkuasennelman käyttäminen harjoituskappaleena varmisti osittain sitä, ettei ylimääräisiä epäpuhtauksia tuotaisi laitteistoon.

Harjoitussarjan jälkeen suoritettiin kaapin perusteellinen pesu. Tämä toimenpide joudutaan suorittamaan säännöllisin väliajoin, sillä puhdistilaan jää yleensä jonkin verran epäpuhtauksia edellisten komponenttipesujen johdosta. Lisäksi puhdistilan luukkua avatessa pääsee sinne aina kulkeutumaan epäpuhtautta muun muassa ilman, käyttäjän vaatteiden ja mahdollisten asennustyökalujen välityksellä. Myös nyt luukkua jouduttiin avaamaan, koska pistesuuttimelle tuleva paineliitäntä täytyi siirtää etuseinään. Tämän seurauksena paineinen irrotusneste saatiin ohjattua tutkittavalle letkuasennelmalle.

4.1.3 Mittauksien ja analysoinnin suoritus

Ennen letkuasennelman kiinnittämistä testikaapin liitäntöihin, pyyhittiin kaikkien liittimien ulkopinnat nukkaamattomalla liinalla. Tällä toimenpiteellä vältettiin ylimääräisten hiukkasten joutumista märkäpinnoille asennusvaiheessa. Mahdolliset suojatulpat poistettiin liittimien päistä vasta juuri ennen letkuasennelman kiinnitystä testikaappiin.

Varsinaiset mittaukset suoritettiin siten, että kummankin letkuvalmistajan toimittamista letkuasennelmista ensimmäisellä haettiin sopivat, valmistajakohtaiset irrotusparametrit. Näitä testisarjoja ei otettu mukaan virallisiin lopputuloksiin, ainoastaan niiden avulla saatiin jonkinlainen käsitys tutkittavan komponenttisarjan puhtaustasosta. Tällöin pystyttiin muun muassa päättelemään, oliko tarvetta jakaa ensimmäistä näytettä useampaan osaan. Näytteen jakamisella vähennettiin yhdelle kalvosuodattimelle tulevien hiukkasten lukumäärää ja päällekkäisyyttä, joka joissain tapauksissa oli edellytys analysoinnin onnistumiselle.

Koska letkuasennelman läpi virrannut irrotusneste kulkeutui vapaasti pesutilassa olevaan altaaseen, täytyi jokaiseen näytteeseen sisällyttää myös roiskealueiden huuhtelu. Roiskeiden kohteeksi joutuivat ainakin puhdastilan etuseinä, osittain sivuseinät, hanskat ja ritilä. Yhteen näytteeseen käytetty nestemäärä jaettiin siten, että letkuasennelman huuhtomisen jälkeen roiskealueita pestiin ensin käsihuuhtelulla ja lopuksi testikaapin kiinteää pesusuutinta käyttäen. Etenkin kiinnitettiin huomiota seinien nurkkien pesuun.

Ensimmäinen testisarja tehtiin niin, että jokaiseen näytteeseen käytettiin nestettä viisi litraa. Tämä jaettiin siten, että letkuasennelman huuhtomiseen 2 l (tilavuusvirta 2,4 l/min), käsinpesuun 1 l ja automaattipesuun 2 l. Tulosten analysoinnin perusteella huomattiin, että suurin osa hiukkasista irtoaa jo ensimmäisellä irrotuskerralla. Tältä pohjalta pienennettiin komponentin läpi kulkevaa nestemäärää arvoon 1,5 l, jolloin hiukkasia ehtii irrota vähemmän ensimmäisellä huuhtelukerralla. Samalla myös automaattipesun käyttämä nestemäärä pudotettiin 1,5 litraan.

Nollapuhtausnäytteet tehtiin samalla kokonaislitramäärällä kuin varsinaiset mittauksetkin. Nyt nestemäärä käytettiin roiskealueiden huuhteluun siten, että sekä käsi- että automaattipesu tehtiin 2 l nestemäärällä, jolloin 4 l kokonaismäärä täsmää varsinaisten näytteiden kanssa. Ajan säästämiseksi nollapuhtausnäytteet analysointiin yhdessä muiden näytteiden kanssa. Haittana tässä oli kuitenkin se, ettei etukäteen tiedetty, toteutuisivatko standardin vaatimukset alkupuhautauden osalta.

Jokaiselle letkukomponentille suoritettiin kuusi näytettä sekä alkua- ja loppupuhtausnäytteet. Aikaisempiin laboratoriossa suoritettuihin tutkimuksiin perustuen, on todettu käytännöllisimmäksi tavaksi ottaa kaikki kuusi näytettä kerralla. Yhden näytteen ottaminen vei tässä tapauksessa aikaa noin kymmenen minuuttia. Tämä on suhteellisen pieni aikalisä verrattuna riskiin, että myöhemmin tuloksia analysoitaessa ei saavutettaisikaan 10 % rajaa vähemmillä näytteillä. Yritykseltä A huuhdeltiin kolme ja yritykseltä B kaksi letkuasennelmaa.

Vaihdettaessa tutkittua letkukomponenttia uuteen, ei puhdastilan luukkuu tarvinnut avata, jolloin säästyttiin aikaa vievältä kaapin pesulta. Noin metrin mittainen letkuasennelma kiinnitettynä testikaapin liitäntöihin ei pahemmin estänyt kaapin sujuvaa käyttämistä, saati liikkumista laboratoriotiloissa. Tällöin oli koko ajan mahdollista pitää jotakin letkua kiinni liitännöissä, vaikka testilaitteistoa käytettiin välillä muuhun mittaustoimintaan. Täten säästyttiin liitäntöjen tulppaamisen aiheuttamalta epäpuhtausriskiltä.

Mitattujen näytteiden kalvosuodattimet asetettiin Petri-maljoihin ja siirrettiin kuivatusuuniin. Usein uunia ei kuitenkaan pidetty päällä, vaan annettiin näytteiden kuivua rauhassa seuraavaan päivään. Kuivatuksen ajaksi Petri-maljan kansi oli jätettävä hieman raolleen, jotta liuotin pääsi haihtumaan suodattimen pinnasta. Petri-maljat puhdistettiin suodatetulla paineilmalla ennen käyttöä, sillä niihin saattoi jäädä epäpuhtauksia aikaisempien mittausten kalvosuodattimista.

Jokainen näyte analysointiin IHA:n Carl Zeiss Axio Imager M2 –mikroskoopilla (kuva 4.2). Mikroskoopin rakenteen lisäksi kyseisestä kuvasta erottuu x-, y-, ja z-liikesuunnissa motorisoidun näytealustan päällä oleva näytteenpidin. Laitteisto on kytketty PC:hen, jolloin sitä voidaan hallita Carl Zeissin Axio Vision - ohjelmiston välityksellä. Kyseinen ohjelmisto sisältää Particle Analyser –ohjelmistomoduulin, jolla standardin mukainen hiukkaslaskenta onnistuu.



Kuva 4.2. Carl Zeiss Axio Imager M2 –mikroskooppi.

Automaattisen hiukkaslaskennan jälkeen tulokset tarkistettiin vielä käsin. Kaikki yli 100 μm suuruiset hiukkaset tutkittiin yksitellen, tarkoituksena poistaa kaikki virhetapaukset. Näitä olivat etenkin mittaajasta ja työvälineistä peräisin olevat hiukkaset, jotka olivat yleensä erilaisia kuituja. Muita virhelaskentoja syntyi, kun kuva-analyysi-ohjelmisto esimerkiksi yhdisti kaksi erillistä hiukkasta samaksi tai päinvastoin. Myös naarmut ja epäpuhtaudet näytelasin pinnassa vaikuttivat automaattisen hiukkaslaskennan tuloksiin. Kun yhdestä näytteestä laskentatulokset oli saatu korjattua, otettiin suurimmista ja mielenkiintoisimmista hiukkasista valokuvat ohjelmiston avulla.

Aikaisemmin IHA:ssa on tehty Excel-taulukkopohja, johon yksittäisten näytteiden tulokset kerättiin. Tämä ohjelma laski yhteen yhden mittaussarjan kaikki näytteet, piirsi irrotuskäyrät ja laski CCC-koodin. Lisäksi ohjelma ilmoitti, mikäli standardin vaatimukset eivät toteutuneet niin nollapuhtausnäytteiden kuin hiukkaslukumäärien osalta.

4.1.4 Tulokset

Letkuasennelmien mittaussarjojen tulokset on esitetty liitteessä 1 ja niitä vastaavien nollapuhtausnäytteiden tulokset liitteessä 2. Taulukkoon 4.1 on koottu molempien valmistajien mittaussarjojen keskiarvot 1000 cm^2 märkäpinta-alaan suhteutettuna.

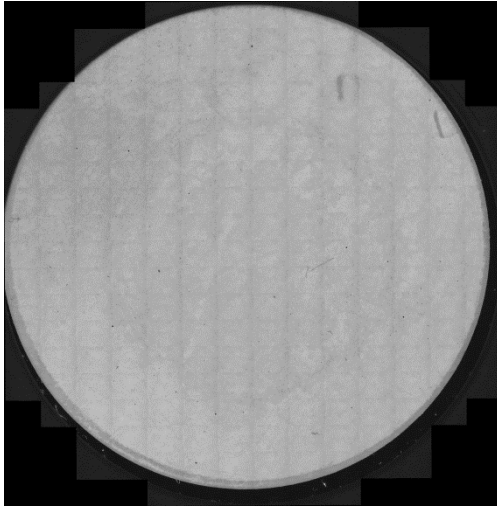
Taulukko 4.1. *Letkuasennelmien mittaussarjojen keskiarvot.*

Valmistaja	Mittaussarjojen keskiarvon CCC-koodi
A	CCC = A (D13 / E11 / F7 / G6 / H5 / I2 / J2 / K0)
B	CCC = A (D15 / E14 / F12 / G11 / H11 / I7 / J6 / K4)

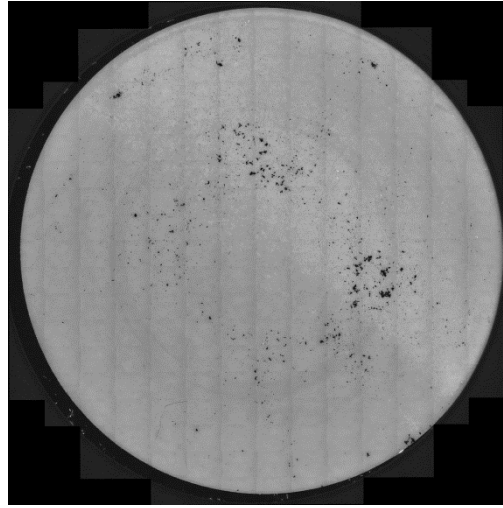
Taulukosta 4.1 nähdään, että valmistajan A tuottama letkuasennelma on huomattavasti puhtaampi kuin valmistajan B kohdalla. Etenkin keskisuurten ja isojen hiukkasten kohdalla ero on suuri. Tuloksista voidaan päätellä, että letkun tulppapuhalluksella saadaan poistettua merkittävästi hiukkasia.

Nollapuhtausnäytteissä esiintyi jonkin verran liian suuria hiukkasia. IHA:n komponenttipuhtautustutkimuksissa on otettu käytäntö, ettei nollapuhtausnäyte täytä vaatimuksia, jos siinä esiintyy hiukkasia kokoluokasta H ($x \geq 200 \mu m$) ylöspäin. Nyt näin kävi kaikissa valmistajan B mittaussarjoissa sekä valmistajan A mittaussarjan 1 alkupuhtausnäytteessä. Liitteen 2 taulukosta nähdään, että kyseessä oli korkeintaan kaksi hiukkasta yhtä nollapuhtausnäytettä kohti, joiden takia näyte ei tullut hyväksytyksi.

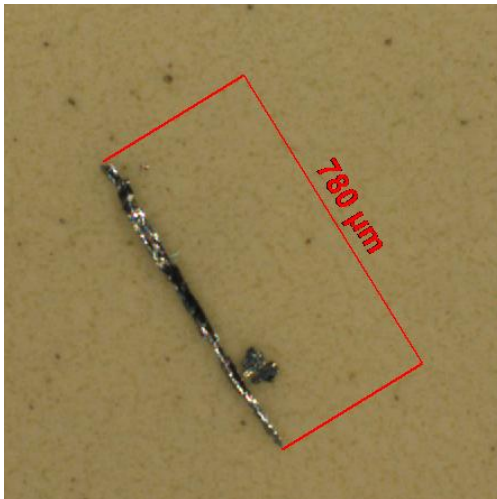
Kuvissa 4.3 ja 4.4 on esitetty kalvosuodattimien kuvat molempien letkuvalmistajien mittaussarjan 1 ensimmäisistä näytteistä. Kuvissa 4.5 ja 4.6 on huuhtelussa irronneita hiukkasia suurennettuna mittaussarjoista 2.



Kuva 4.3. Ensimmäinen näyte letkuvalmistajan A letkuasennelman mittausarjasta 1.



Kuva 4.4. Ensimmäinen näyte letkuvalmistajan B letkuasennelman mittausarjasta 1.



Kuva 4.5. Letkuvalmistajan A letkuasennelman mittausarjan 2 näytteestä 1 löytynyt hiukkanen.



Kuva 4.6. Suurennos letkuvalmistajan B letkuasennelman mittausarjan 2 näytteestä.

Kuvista 4.3 ja 4.4 on nähtävissä ero ensimmäisissä näytteissä letkuvalmistajien kesken. Letkuvalmistaja B näytteessä näkyvät hiukkaset ovat suurelta osin kumimateriaalia, jotka ovat syntyneet letkun katkaisutyössä. Samoin katkaisun vaikutuksesta letkuvalmistajan A asennelmasta löytyi kuvan 4.5 metallihiukkanen, joka on todennäköisesti peräisin letkun teräskudorakenteesta.

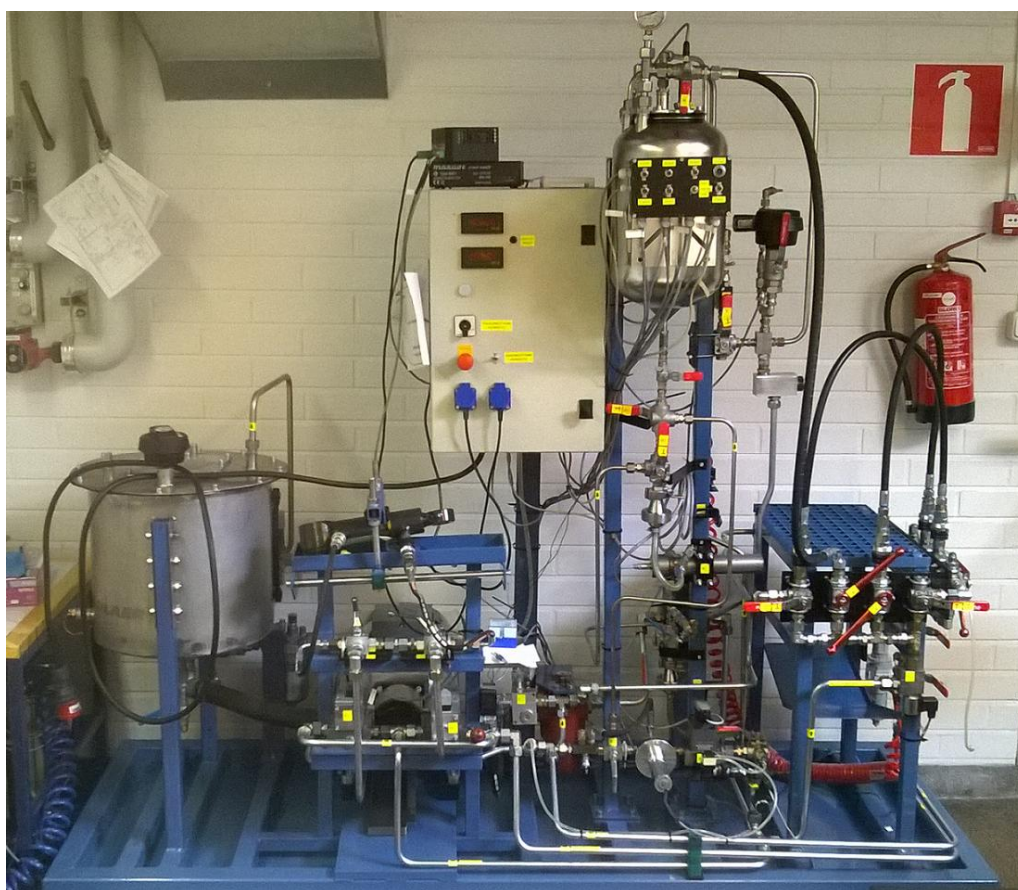
4.2 Letkumittaukset IHA:n testipenkillä

Puhtaustestikaapilla tehtyjen mittausten jälkeen suoritettiin vastaaville letkuasennelmille vertailumittaukset myös IHA:n testipenkillä. Tämä vuonna 2011 valmistunut puhtausmittauslaitteisto on tarkoitettu toimitusvalmiiden hydraulikomponenttien puhtaus-

tutkimukseen. Laitteiston avulla saadaan luotua tutkittavalle komponentille sen todelliset käyttöolosuhteet. Testipenkki on toteutettu diplomityönä ja keskeinen syy näillä mittauksilla oli saada lisää käyttökokemusta laitteistosta. Suurin etu puhtaustestikaappiin nähden on se, että testipenkillä pystytään tuottamaan huomattavasti suurempi tilavuusvirta letkuasennelman läpi. Haasteina olivat laitteiston monimutkaisempi rakenne ja irrotusnesteenä toimivan öljyn tuomat vaikeudet kalvosuodattimien käsittelyssä.

4.2.1 Testipenkin rakenne ja toiminta

Mittauslaitteisto on suunniteltu ja rakennettu IHA:n toimesta ja samalla ainoa pelkää testipenkkimenetelmää hyödyntävä puhtaustmittauslaitteisto Suomessa (kuva 4.7). Sillä voidaan irrottaa epäpuhtaushiukkasia erilaisista osakokoonpanoista, kuten sylintereistä, venttiililohkoista ja letkuista. Sylintereiden mittauksissa käytetään omaa irrotuspiiriä, kun taas läpivirtauksen mahdollistavia komponentteja tutkittaessa järjestelmässä on toinen irrotuspiiri. Testipenkin rakenne koostuu primääripuolesta, huoltolaitteistosta, epäpuhtauksien irrotuspiireistä ja irrotusnesteen analysointilinjasta. Testilaitteisto tarvitsee toimiakseen paineilman syötön ja 16 A:n voimavirran.



Kuva 4.7. Testipenkki.

Irrotusnesteen virtaus tuotetaan kiinteätuottoisella pumpulla (60 l/min), jota pyöritetään taajuusmuuttajaohjatulla sähkömoottorilla. Irrotusnesteenä testikoneikossa käytetään

ISO VG 10 –hydrauliöljyä. Pumpulta tuleva neste johdetaan siihen irrotuspiiriin, jossa tutkittava komponentti on. Irrotuspiirissä, jossa epäpuhtaudet irrotetaan läpivirtauksella, on neljä sisäänmenoa ja ulostuloa. Tämä mahdollistaa esimerkiksi monikanavaisen venttiililohkon mittaamisen. Letkumittauksissa käytettiin tätä piiriä kytkemällä letku-asennelma yhteen paine- ja paluulinjaan. Irrotuspiireiltä neste johdetaan joko analysointisäiliöön tai huuhtelukierrolla suoraan huoltopiiriin.

Käytetty irrotusneste varastoidaan analysointisäiliöön, jossa nesteessä oleva ilma pystytään erottamaan alipaineella. Hiukkasanalysointi voidaan tehdä joko automaattisella hiukkaslaskurilla tai mikroskoopilla, joten neste johdetaan analysointitavasta riippuen hiukkaslaskurin tai kalvosuodattimen läpi. Analysointisäiliön tyhjennystä varten se ylipaineistetaan ja virtausta jarrutetaan hydraulimoottorilla. Hydraulimoottoriin on kytketty tasavirtamoottori, jota säädetään potentiometrillä. Jotta kalvosuodatin saadaan mahdollisimman kuivaksi ennen sen poistamista suodatinpitimestä, on analysointipiiriin lisätty jälkeensä sähkömoottorikäyttöinen pumppu. Tämä pumppu sijaitsee hydraulimoottorin rinnalla ja on erotettavissa sulkuventtiileillä. Lopuksi irrotusneste johdetaan tilavuusvirtamittarin kautta huoltopiiriin (paluusuodatin, jäähdytin ja pääsäiliö).

Testipenkkiä ohjataan taajuusmuuttajan käyttöpaneelin, käsikäyttöisten sulkuventtiileiden ja magneettiventtiileiden avulla. Lisäksi analysointisäiliön ylitäytön ehkäisemiseksi järjestelmä on varustettu pinnankorkeusanturilla ja sitä valvovalla logiikkaohjauksella.

4.2.2 Letkuasennelman liittäminen testipenkkiin

Tutkittava letkuasennelma kytkettiin testikoneikon irrotuspiiriin pikaliittimillä (kuva 4.8).



Kuva 4.8. Letkuasennelma kytkettynä testikoneikkoon.

Jatkossa letkunvaihto suoritettiin avaamalla pelkästään letkupäiden kierreliitännät, jolloin poissuljettiin pikaliittimien avaamisen vaikutus puhtaustuloksiin. Ennen varsinaisia letkumittauksia haluttiin kuitenkin tutkia, aiheuttaako pika- ja kierreliittimien avaaminen epäpuhtaushiukkasia järjestelmään. Nämä kokeet suoritettiin etukäteen huuhdellulla letkuasennelmalla.

Kierreliitos

Kierreliitoksen toiminta perustuu kierrepintojen väliseen kitkaan, jossa kierteiden harjat leikkautuvat toisiaan vasten. Tästä on seurauksena se, että kierteen pinnasta irtoa aina jonkin verran materiaalia, joka voi kulkeutua hydraulijärjestelmään etenkin liitosta avattaessa.

Koejärjestely tehtiin avaamalla viisi kertaa letkuasennelman kumpaakin kierreliitosta. Liitosmutterin avaamisen jälkeen letkun pää nostettiin muutaman sentin irti pikaliitimestä ja laitettiin takaisin. Ennen uutta avaamista, mutteri kiristettiin normaaliin tiukkuuteen.

Mittaukset aloitettiin huutelemalla koneikkoon kiinnitetty letkuasennelma, jonka jälkeen otettiin alkupuhtausnäyte. Seuraavaksi suoritettiin kierreliitosten avaamiset, jota seurasi kuusi huuhtelua ja loppupuhtausnäytteen ottaminen. Irrotusparametreina käytettiin 12 l/min virtausta ja 2 l nestettä yhtä näytettä kohti. Koe toistettiin kolme kertaa käyttämällä samaa letkuasennelmaa jokaisessa mittauksessa. Tarkempi kuvaus epäpuhtauksien irrotusprosessista on selostettu luvussa 4.2.3.

Saadut näytteet analysoitiin samalla tavalla kuin puhtaustestikaappia käytettäessä. Poikkeuksena oli, ettei näytteitä kuivatettu uunissa ollenkaan. Syynä tähän oli irrotusnestenä käytetty hydraulijöllyä, jota ei pystynyt haihduttamaan. Lisäksi mikroskoopin näytteenpitimen lasi vaati huolellisempaa puhdistamista näytteitä vaihtaessa, koska se öljyyntyi herkästi.

Kierreliittimen tiivistyskartiosta johtuen kierrettä ei voitu huuhdella. Tässä tapauksessa saadut mittaustulokset suhteutettiin niin, että kontrolloituna pinta-alana käytettiin liittosmutterien kierteiden yhteispinta-alaa. Märkäpinta-alan määrittäminen on esitetty liitteessä 3.

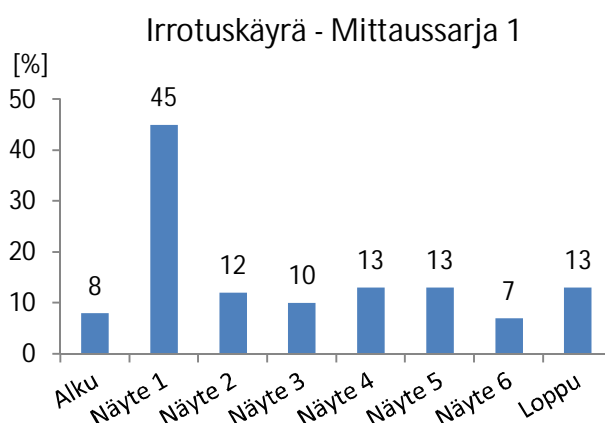
Taulukossa 4.2 on esitetty mittaussarjojen keskiarvot, jotka pohjautuvat liitteen 1 mittaustuloksiin.

Taulukko 4.2. Kierreliitoksen mittaussarjojen keskiarvot.

	Mittaussarjojen keskiarvon CCC-koodi
5 kpl liittämistä	CCC = A (D17 / E15 / F12 / G11 / H9 / I7 / J00 / K00)
1 kpl liittämistä	CCC = N (D95 / E32 / F3 / G1 / H1 / I0 / J0 / K0)

Tulokset ovat ilmoitettu taulukossa 4.2 niin, että liittosmutterin viiden aukaisun tuottama hiukkasmäärä on suhteutettu 1000 cm² kontrolloituun pinta-alaan. Alemmalla rivillä oleva puhtauskoodi kertoo yhtä kierreliitosta kohden (N) syntyvän hiukkaslukumäärän.

Mittaussarjan 1 irrotuskäyrä on esitetty kuvassa 4.9.

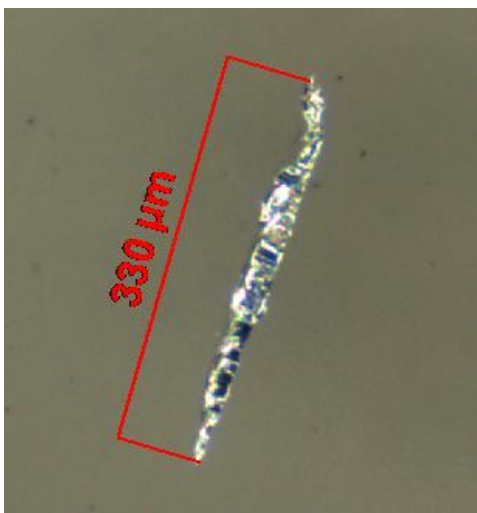


Kuva 4.9. Kierreliitoksen mittaussarjan 1 irrotuskäyrä.

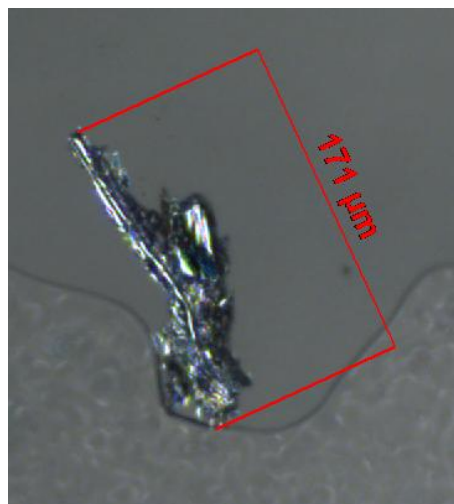
Irrotuskäyrästä havaitaan, että liitosta avattaessa järjestelmään päässeet hiukkaset huuhtoutuivat pääosin jo ensimmäisellä näytteenotokerralla. Loppupuhtausnäyte ei alita vaadittua 10 % raja-arvoa, joten huuhtelukertojen kokonaishiukkaslukumäärä on melko alhainen. Sama tilanne toistui myös muiden mittaussarjojen kohdalla, joissa nollapuh-

tausunäytteiden hiukkasmäärät olivat suhteellisesti liian korkeita, mittaussarjan 2 alkupuhtautta lukuun ottamatta. Mittaussarjoissa 2 ja 3 kuudensien näytteiden hiukkasmäärät eivät alittaneet 10 % rajaa kokonaishiukkasmäärästä. Kierreliitoksien avaamiskertojen lisääminen (esimerkiksi 10 kpl/liitos) kasvattaisi hiukkasmääriä niin, että mittaussarjoista saataisiin standardin mukaisia.

Sen sijaan mittauksissa esiintyi yksittäisiä metallihiukkasia, joita on esitetty kuvissa 4.10 ja 4.11.



Kuva 4.10. Kierreliitoksen mittaussarjan 1 näytteistä löytynyt hiukkanen.



Kuva 4.11. Kierreliitoksen mittaussarjan 1 näytteestä löytynyt hiukkanen.

Kuvista voidaan todeta, että letkuasennelman liittäminen kierreliitoksella testipenkkiin tuottaa metallihiukkasia, joista osa pääsee järjestelmään liitoksen avaamisen yhteydessä. Alkupuhtausnäytteissä ei vastaavanlaisia metallihiukkasia ilmaantunut, joten hiukkaset ovat mitä todennäköisimmin peräisin kierreliitoksista.

Pikaliitos

Vastaavanlainen mittaussarja tehtiin myös pikaliittimien avaamiselle. Pikaliitintä kytkettäessä uros- ja naarasliittimen vastaventtiilit painautuvat toisiaan vasten, jolloin virtaustie avautuu. Tällöin on mahdollista, järjestelmään pääsee kulkeutumaan epäpuhtauksia, jotka ovat peräisin liittimien pinnoilta. Tutkittujen pikaliittimien koko oli 3/4”.

Koejärjestely suoritettiin samalla tapaa ja samoilla parametreilla, kuin kierreliittimien tapauksessa. Liittimiä avattiin yhteensä kymmenen kertaa ja koe toistettiin kolmesti. Kuten kierreliitosmittausten kohdalla, myös pikaliittimien tapauksessa varsinaista epäpuhtaushiukkasten syntymispintaa ei voitu huuhdella. Pikaliittimen kontrolloidun pinta-alan määrittäminen on esitetty liitteessä 3.

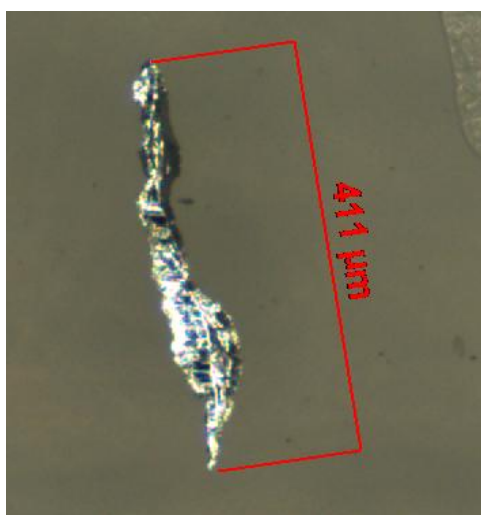
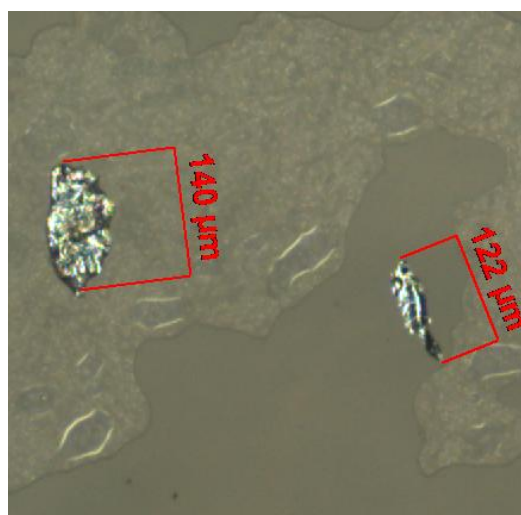
Pikaliitoksen avaamista tutkivien mittaussarjojen tuloksien keskiarvot on koottu taulukoon 4.3 liitteen 1 mittaustiedoista.

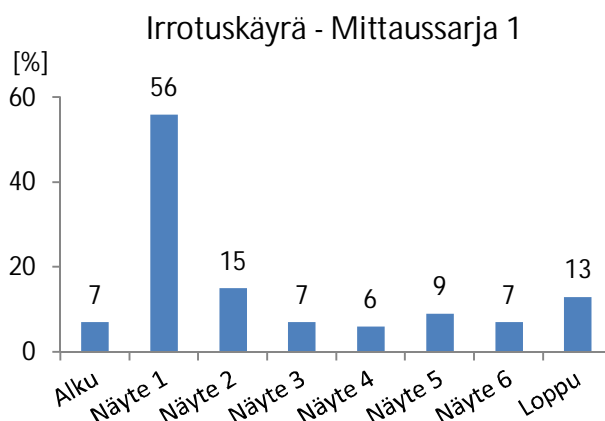
Taulukko 4.3. Pikaliitoksen mittaussarjojen keskiarvot.

	Mittaussarjojen keskiarvon CCC-koodi
5 kpl liittämistä	CCC = A (D18 / E16 / F13 / G10 / H10 / I7 / J00 / K00)
1 kpl liittämistä	CCC = N (D113 / E36 / F5 / G1 / H1 / I0 / J0 / K0)

Tulokset ovat ilmoitettu taulukossa 4.3 niin, että viiden pikaliitinparin aukaisun tuottamaa hiukkasmäärä on suhteutettu 1000 cm² kontrolloituun pinta-alaan. Alemmalla rivillä oleva puhtauskoodi kertoo yhtä pikaliitinparia kohden (N) syntyvän hiukkasmäärän. Verrattaessa yhden pikaliitinparin tuloksia vastaavan kierrelitoksen aukaisuun huomataan, että pikaliitoksen kytkentä tuottaa hieman enemmän hiukkasia järjestelmään. Toisaalta tutkittu 3/4” -pikaliitinkoko on normaalissa tapauksessa liian suuri 3/8” -letkun kytkemiseen, joten tulokset eivät ole suoraan verrattavissa keskenään.

Kuvissa 4.12 ja 4.13 näkyy pikaliitinten huuhteluissa irronneita hiukkasia. Pikaliitinmittausten mittaussarjan 1 irrotuskäyrä on esitetty kuvassa 4.14.

**Kuva 4.12.** Pikaliitoksen mittaussarjan 1 näytteistä löytynyt hiukkanen.**Kuva 4.13.** Pikaliitoksen mittaussarjan 2 näytteestä löytyneet hiukkaset.



Kuva 4.14. Pikaliitoksen mittaussarjan 1 irrotuskäyrä.

Irrotuskäyrä vastaa hyvin pitkälti kierreliitoksen mittaussarjan 1 irrotuskäyrää. Vaadittu loppupuhtausraja jäi tässäkin mittauksessa saavuttamatta. Ainoastaan mittaussarjan 3 loppupuhtausnäyte oli hyväksyttävällä tasolla. Kuvien 4.12 ja 4.13 kaltaisia metallihiukkasia esiintyi muutamia mittaussarjojen aikana, joiden alkuperän voidaan olettaa olevan pikaliittimet. Irronneista hiukkasista suurin (kuva 4.12) sijoittui puhtausluokkaan I ($400 \mu m \leq x < 600 \mu m$).

Jos haluttaisiin tutkia liitoksen kytkemisessä syntyvää kokonaishiukkasmäärää, parempi menetelmä irronneiden hiukkasten tutkimiseksi olisi käyttää puhtaustestikaappia. Kahdelle puhtaalle liittimelle suoritettaisiin kytkentä ja liitoksen irrotuksen jälkeen niitä huuhdottaisiin painehuuhtelulla. Näin saataisiin kaikki liitoksesta irronneet epäpuhtaudet analysoitavaksi.

4.2.3 Letkumittaukset

Hiukkasten irrotus komponentista tapahtuu parhaiten turbulenttisella huuhteluvirtauksella, joten aluksi selvitettiin tarvittava tilavuusvirta. Jatkuvuusyhtälö (4.1) esitetään muodossa [2, s. 27]

$$Q = vA \quad (4.1)$$

jossa

Q	Tilavuusvirta	[m ³ /s]
v	Keskimääräinen virtausnopeus	[m/s]
A	Virtausta vastaan kohtisuorassa oleva poikkipinta-ala	[m ²]

Virtauksen luonnetta kuvaa yhtälö (4.2) [2, s. 44]

$$Re = \frac{v d}{\nu} \quad (4.2)$$

jossa

Re	Reynoldsin luku	[-]
d	Hydraulinen halkaisija	[m]
ν	Irrotusnesteen kinemaattinen viskositeetti	[m ² /s]

Yhdistämällä yhtälöt (4.1) ja (4.2), saadaan tilavuusvirran laskentayhtälöksi (4.3).

$$Q = \frac{Re \pi d \nu}{4} \quad (4.3)$$

Käyttämällä Reynoldsin lukua 3500 ja irrotusnesteen kinemaattisen viskositeetin ollessa 12 mm²/s, tulee vaadituksi tilavuusvirraksi 19,8 l/min. Kierre- ja pikaliitinmittauksia tehtäessä todettiin, että 2 l nestemäärä yhtä näytettä kohti on liian suuri. Tämä aiheutti sen, että irrotuskäyrästä ei tullut ihanteellinen, vaan suurin osa hiukkasista irtosi jo ensimmäisellä huuhtelukerralla.

Kun huuhtelussa käytettävä nestemäärä on pienempi, jää huuhteluaika etenkin suurella tilavuusvirran arvolla lyhyeksi. Edellä lasketulla noin 20 l/min virtauksella yhden näytteen huuhteluaika on 3 s, joka aiheuttaa haasteita mittaustarkkuudelle. Testikoneikko käynnistetään ja sammutetaan taajuusmuuttajan käyttöpaneelista painonapeilla, jolloin käyntiaika pitää katsoa sekuntikellosta. Tuntui turvallisemmalta pidentää hieman käyntiaikaa tilavuusvirran kustannuksella, jotta mahdolliset erot käyntiajoissa eri näytteiden välillä olisivat suhteessa pienemmät. Ratkaisuna tälle päätettiin käyttää tilavuusvirran arvona 16 l/min, jolloin Reynoldsin luvuksi saatiin 2830.

Kun tutkittava letkuasennelma oli saatu kytkettyä koneikkoon, suoritettiin koneikon huuhtelu. Letkuasennelman päissä olevat sulkuventtiilit pidettiin kiinni, mutta irrotuspiirin tulo- ja paluulinjan yhdistävä sulkuventtiili pidettiin avoinna. Mitattava letkuasennelma oli nyt eristetty, joten nestevirtaus kulki irrotuspiirin tulolinjasta suoraan paluulinjaan ja siitä järjestelmän varastosäiliöön. Huuhtelun kesto oli joitakin minuutteja ja se suoritettiin varsinaisia mittauksia hieman suuremmalla 18 l/min virtauksella. Tällä haettiin sitä, että testijärjestelmän epäpuhtaudet irtoaisivat ennemmin huuhtelun aikana kuin varsinaisissa mittauksissa. Lopuksi käännettiin paluuvirtausta ohjaava venttiili niin, että irrotusnestettä ohjautui joitakin litroja myös analysointisäiliöön. Toistamalla muutamaan kertaan säiliön tyhjennys ja täyttö, saatiin huuhteltua myös analysointipiiri.

Nollapuhautuskoe suoritettiin samalla nestemäärällä kuin varsinaiset näytteet. Nollapuhautuskokeessa nestevirtaus ohjattiin edellä kuvatun huuhteluprosessin tapaan letkuasen-

nelman ohi suoraan analysointisäiliöön. Näyte otettiin pitämällä pumppua käynnissä ennalta määritellyn ajan. Tämän jälkeen ylipaineistettiin analysointisäiliö. Testikoneikko oli liitetty paineilmaverkkoon, josta suodatettu paineilma tuotiin koneikolle paineenalentimen kautta 2 bar paineella. Analysointisäiliön paineistusta ohjattiin 3/2-magneettiventtiilillä, jonka avulla säiliön ylipaine voitiin myös purkaa.

Analysointipiirissä olevat sulkuventtiilit käännettiin asentoihin, jossa irrotusneste pääsi kulkemaan säiliöstä suoraan suodatinpitimelle. Säiliön paineistuksen jälkeen avattiin säiliön pohjaventtiili ja käynnistettiin tasavirtamoottori. Potentiometrillä säädettiin hydraulimoottorin pyörimisnopeus sellaiseksi, että sen läpäisemä tilavuusvirta oli noin 0,5 l/min. Tätä arvoa käytettiin siksi, koska vaihtoehtoisessa menetelmässä käytettäessä hiukkaslaskentaan APC:tä, suurin sallittu virtaus on 500 ml/min.

Kun analysointisäiliö tyhjentyi kokonaan, suljettiin sen pohjaventtiili ja purettiin paineistus. Säiliö voitiin laskea täysin tyhjäksi jokaisella näytteellä, kun taas APC:n antama laskentatulokset vääristyivät, jos sen läpi kulkee ilmakuplia. Samasta syystä analysointisäiliötä ei tarvinnut aluksi alipaineistaa ilmakuplien poistamiseksi. Analysointipiiriin tyhjennykseen tarkoitettu imupumppu käynnistettiin ennen suodatinpitimen avaamista, jonka jälkeen kalvosuodatin otettiin analysoitavaksi ja tilalle vaihdettiin uusi. Pumpun ansios-ta kalvosuodatin saatiin kuivemmaksi irrotusnesteestä.

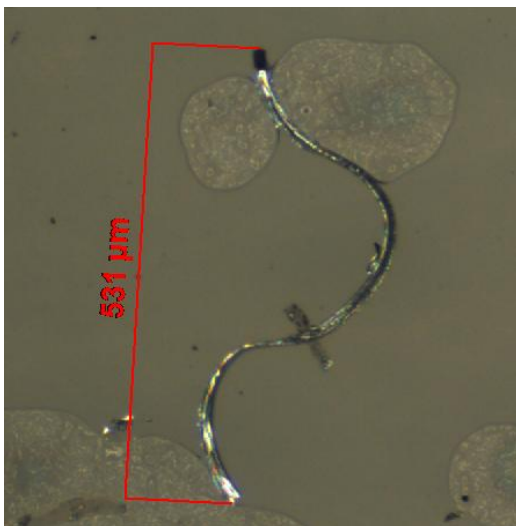
Samalla tapaa suoritettiin myös varsinaisten näytteiden ottaminen. Nyt letkuasennelman eristävät sulkuventtiilit avattiin ja meno-paluulinjan läpikierto suljettiin, jolloin huuhteluvirtaus kulki tutkittavan komponentin läpi. Jokainen komponentti huuhdeltiin kuuteen kertaan, jonka jälkeen otettiin vielä loppupuhautuskoe. Testipenkkimittaukset suoritettiin niin, että kummaltakin yritykseltä mitattiin kaksi letkuasennelmaa.

4.2.4 Letkumittausten tulokset

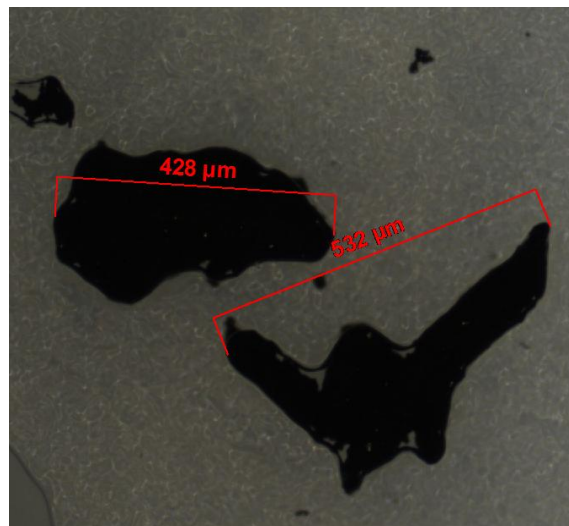
Taulukossa 4.4 on esitetty mittaussarjojen keskiarvot suhteutettuna 1000 cm² märkäpinta-alaan. Mittaussarjojen yksittäiset tulokset löytyvät liitteestä 1. Kuvissa 4.15 ja 4.16 on mittauksissa löytyneitä hiukkasia.

Taulukko 4.4. Letkuasennelmien mittaussarjojen keskiarvot.

Valmistaja	Mittaussarjojen keskiarvon CCC-koodi
A	CCC = A (D14 / E12 / F9 / G7 / H7 / I4 / J4 / K2)
B	CCC = A (D15 / E14 / F11 / G10 / H10 / I6 / J4 / K1)



Kuva 4.15. Letkuvalmistajan A letkuasennelman mittaussarjasta 2 löytynyt hiukkanen.



Kuva 4.16. Letkuvalmistajan B letkuasennelman mittaussarjasta 2 löytyneitä hiukkasia.

Mittausten perusteella letkuvalmistajan A letkuasennelmat ovat puhtaampia kuin valmistajan B. Suurin osa valmistajan B näytteistä löytyneistä hiukkasista on kumihiukkasia (kuva 4.16), joita löytyi valmistajan A letkuasennelmista vain satunnaisia kappaleita.

Näiden letkumittausten nollapuhtausnäytteistä yhteensä kolme kahdeksasta oli hyväksyttyjä. Muissa esiintyi muutama kappale sallittua suurempia hiukkasia. Tehokkaamalla analysointipiirin huuhtelulla ennen mittaussarjan aloittamista olisi ollut mahdollista saada alkupuhtausnäytteet hyväksyttävälle tasolle. Sen sijaan loppupuhtausnäytteiden tulos on hankalammin selitettävissä, sillä kahdessa tapauksessa neljästä loppupuhtausnäytteessä oli enemmän hiukkasia kuin kyseisen mittaussarjan 6. näytteessä. Suurentamalla yhteen näytteeseen käytettävää nestemäärää tai virtausnopeutta, saadaan todennäköisemmin kaikki irronneet hiukkaset mukaan jo varsinaisiin näytteisiin. Haittapuolena olisi se, että irrotuskäyrän muoto muuttuisi epäihanteellisemmaksi, koska suurin osa hiukkasista irtoaisi jo ensimmäisessä huuhtelussa.

4.2.5 Käyttökokemuksia testipenkistä

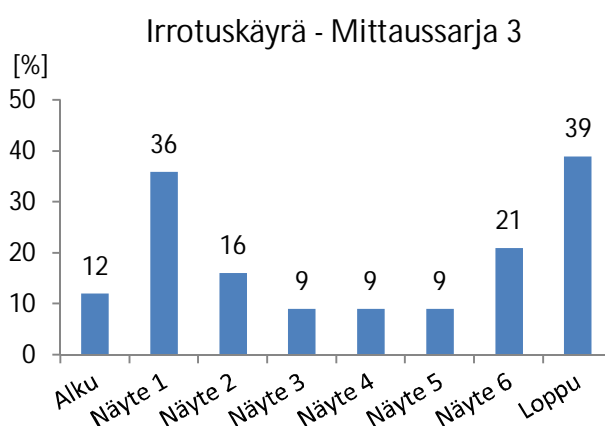
Nykyisellä IHA:n henkilökunnalla oli jonkin verran kokemusta testipenkin käyttämisestä. Letku- ja liitosmittausten ohessa saatiin paljon lisätietoa laitteiston toiminnasta, jonka perusteella tulevista mittauksista saadaan jatkossa luotettavampia. Projektin aikana testipenkkiin tehtiin muutama pieni rakenteellinen muutos helpottamaan käytettävyyttä.

Mittausten aikana suurin huomio kiinnittyi analysointisäiliöön johtavan putken värähtelyyn, joka ilmeni satunnaisia kertoja huuhteluiden aikana. Pumpun käynnistämisen jälkeen irrotusnesteen alkaessa virrata analysointisäiliöön, alkoi säiliöön johtava putki värähdellä. Yleensä tämä värähtely vaimeni nopeasti, mutta pahimmillaan se kesti koko

näytteenottoajan. Värähtelyyn etsittiin syytä kokeilemalla pumppua eri pyörimisnopeuksilla, mutta selkeää johtopäätöstä asiaan ei saatu. Yhtenä syynä värähtelyyn olisi voinut olla putkeen päässyt ilma. Toisaalta tämä ei ole mahdollista, koska putken ja säiliön liitännän välissä olevan vastaventtiilin tehtävä on estää ilman pääsy putkeen.

Todennäköisempi syy on itse vastaventtiili, joka on liian suuri käytetyille virtauksille. Kun irrotusnesteen paine riittää avaamaan jousikuormitetun sulkukappaleen, avautuu virtaustie niin suureksi, että paine romahtaa ja venttiili sulkeutuu. Tämä aikaansaa jatkuvan värähtelyn koko putkeen.

Kuvassa 4.17 on esimerkki mittaussarjasta, jossa huuhteluiden aikana esiintyi värähtelyä analysointisäiliöön johtavassa putkessa.



Kuva 4.17. Mittaussarja, jossa paluuputken värähtelyä ilmeni loppupään näytteissä.

Irrotuskäyrästä nähdään, kuinka paluuputken värähtely vaikuttaa mittaustuloksiin. Näytettä 6 sekä loppupuhtausnäytettä otettaessa värähtelyä ilmeni koko huuhtelun ajan. Sen vaikutuksesta hiukkasia on irronnut säiliöön johtavan putken seinämiltä vääristäen mittaustuloksia.

Kalvosuodattimille kerätyt näytteet voidaan analysoida heti, koska uunikuivatuksesta ei irrotusnesteenä olevan öljyn tapauksessa ollut mitään hyötyä. Näin ollen alkupuhtausnäyte kannattaa jatkossa analysoida saman tien ennen varsinaisten näytteiden ottamista, jolloin saadaan varmistus testikoneikon puhtaustasosta.

4.3 Puhtaustestikaapilla ja testipenkillä saatujen tulosten vertailu

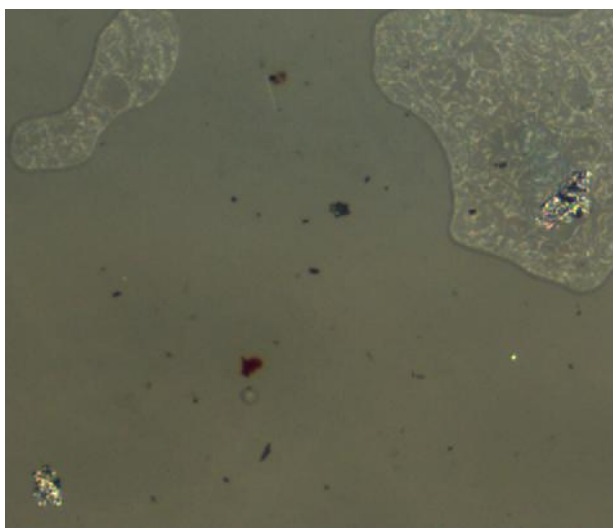
Hydac'in puhtaustestikaapilla ja testipenkillä suoritettujen letkumittausten tulokset on koottu taulukkoon 4.5.

Taulukko 4.5. Letkuasennelmien mittaustulosten riippuvuus puhtausmittauslaitteistosta.

Valmistaja	Mittauslaitteisto	Mittaussarjojen keskiarvon CCC-koodi
A	CTU 1230	CCC = A (D13 / E11 / F7 / G6 / H5 / I2 / J2 / K0)
	Testipenkki	CCC = A (D14 / E12 / F9 / G7 / H7 / I4 / J4 / K2)
B	CTU 1200	CCC = A (D15 / E14 / F12 / G11 / H11 / I7 / J6 / K4)
	Testipenkki	CCC = A (D15 / E14 / F11 / G10 / H10 / I6 / J4 / K1)

Saman letkuvalmistajan tulokset poikkeavat jonkin verran toisistaan, kuten taulukosta 4.5 nähdään. Tulokset ovat ristiriitaisia siinä mielessä, että valmistajan A letkuasennelma on epäpuhtaampi testipenkillä mitattuna, kun taas valmistajan B kohdalla tilanne on päinvastainen. Näin suuria vaihteluja selittää osittain se, että mittaussarjojen lukumäärä oli vähäinen. Teoriassa testipenkissä käytetty suurempi nesteen virtausnopeus kykenee irrottamaan paremmin epäpuhtaushiukkaset, jolloin sillä mitatut letkuasennelmat pitäisivät olla epäpuhtaampia.

Etenkin valmistajan A testipenkillä mitatuissa mittaussarjoissa oli useita metallihiukkasia, joita ei esiintynyt käytettäessä testikaappia. Ainoa ero letkuasennelman kiinnittämisessä puhtaustestilaitteistoihin on kierrelitosten asento. CTU 1230:ssa liitännät ovat vaaka-asennossa, kun taas testipenkissä ne ovat pystyssä. Tällä selittyisi, että testipenkkiin olisi helpompi kulkeutua kierrelitännän epäpuhtaushiukkasia letkunvaihdon yhteydessä. Toinen syy testipenkkimittausten epävarmuuteen on analysointisäiliölle johtavan putken värähtely, jota esiintyi satunnaisesti mittauksien aikana. Kuva 4.18 esittää tilannetta, jossa paluuputken värähtelyä tapahtui.

**Kuva 4.18.** Letkuvalmistajan A letkuasennelman mittaussarjasta 1 löytyneitä hiukkasia käytettäessä testikoneikkoa.

Resonointi irrotti testipenkin putkistosta hiukkasia, jotka näkyivät mittaustuloksissa. Värähtelyn tuoman epäpuhtausvaikutuksen tunnistaa muun muassa oheisen kuvan

oransseista hiukkasista, joita esiintyi vain värähtelyn yhteydessä. Näiden hiukkasten tarkempaa alkuperää ei putkistorakenteen tuntemattomuudesta johtuen saatu selville.

5. LETKUASENNELMAN VALMISTAMISEEN LIITTYVÄT PUHTAUSMITTAUKSET

Letkuasennelmien mittaamisen lisäksi projektin aikana tutkittiin myös tutkittuihin letkuasennelmiin liittyvien esineiden puhtautta. Tutkittavina komponentteina olivat 3/8” letkuun sopiva suora letkuliitin, valmiin letkuasennelman liittimen pään suojaksi asennettava kutistesuoja ja kyseisen letkumateriaalin puhdistuksessa käytettävä puhallustulppa. Komponentit pestiin puhtaustestikaapilla ja tulokset analysoitiin mikroskoopilla.

Toisena tutkimuskohteena oli letkun katkaisutavan vertailu. Tässä tutkittiin katkaisutyön tuottamaa hiukkaslukumäärää, joka jää letkun sisälle katkaisun jälkeen. Letkuja katkaistiin eri menetelmillä, jolloin voitiin vertailla katkaisutapoja puhtauden näkökulmasta. Nämä mittaukset tehtiin edellisistä komponenttimittauksista poiketen kaatosuppilolla varustetulla hiukkastenkeräyslaitteistolla.

5.1 Letkuliitin

Letkuliittimet ovat osa letkuasennelmaa, joten päätettiin tutkia niiden sisältämää epäpuhtaustasoa. Ne noudettiin letkuasennelmia valmistavan asiakasyrityksen varastosta. Tutkimukseen valikoitui JIC-standardin mukainen, 1/2” -letkulle soveltuva suora letkuliitin. Liittimet olivat irrallisina sekaisin suljetuissa pahvilaatikoissa, joissa alihankkija on ne toimittanut yritykseen. Otos kuvaa sitä puhtaustasoa, jollaisina liittimet menevät asennelmia valmistavaan tuotantosoluun. Tutkimukseen otettiin kaksi liittintä ja ne toimitettiin ruostesuojapusseissa laboratorioon. Kuvassa 5.1 on esitetty tutkittava liitin.



Kuva 5.1. Puristettava letkuliitin.

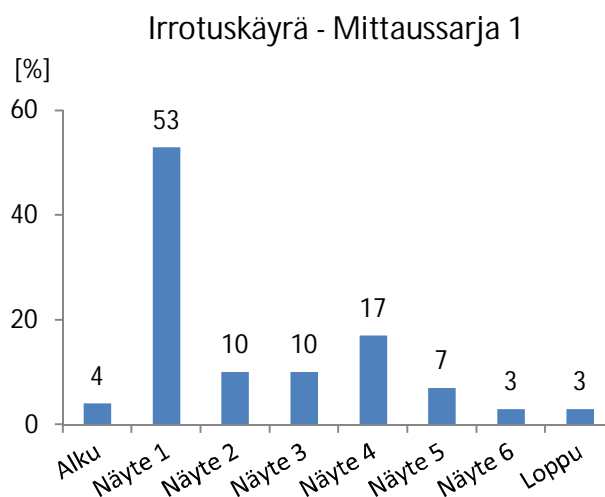
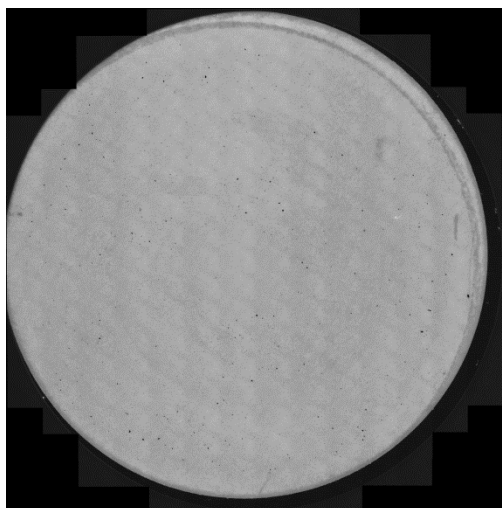
Tutkittavina pintoina olivat liittimen märkäpinta eli karan sisäpinta ja liitosmutterin kierreosa. Nämä osat vaikuttavat eniten letkuasennelman puhtauteen. Kierteen sisältämät epäpuhtaudet voivat kulkeutua järjestelmään liitosta avattaessa, mutta letkuun puristuvat karan ja ulkoolkin pinnat eivät vaikuta letkuasennelman loppupuhtauteen. Näin ollen ulkopintoja sekä ulkoolkin sisäosaa ei otettu tarkastelussa huomioon, joten niiden huuhtelemista vältettiin. Ennen pesua liittimen ulkopinnat pyyhittiin nukkaamatomalla liinalla.

Kummallekin liittimelle suoritettiin samanlainen koejärjestely samoilla irrotusparametreilla. Yhteen näytteeseen käytetty nestemäärä jaettiin niin, että 0,5 litralla pestiin komponenttia, jonka jälkeen roiskealueita huuhdottiin 1,5 litralla. Irrotusneste ruiskutettiin liittimen läpi liitosmutterin puolelta pyörittäen samalla mutteria. Alun ja lopun nollapuhautuskokeisiin käytettiin irrotusnestettä 2 l, joka jaettiin puoliksi käsi- ja automaattihuuhteluiden kesken. Pesusuuttimen läpäisemä tilavuusvirta oli jokaisessa vaiheessa 1,65 l/min. Liittimistä otettiin kaikki kuusi näytettä, jotka analysoitiin samalla kertaa yhdessä nollapuhautusnäytteiden kanssa.

Taulukkoon 5.1 on koottu mittausarjojen tuloksien keskiarvo suhteutettuna 1000 cm² märkäpinta-alaan. Kuvassa 5.2 on esitetty ensimmäisen näytteen kalvosuodatin mittausarjasta 1 ja kuvassa 5.3 vastaavan mittausarjan irrotuskäyrä. Liittimistä irronneita hiukkasia on esitetty kuvissa 5.4 ja 5.5.

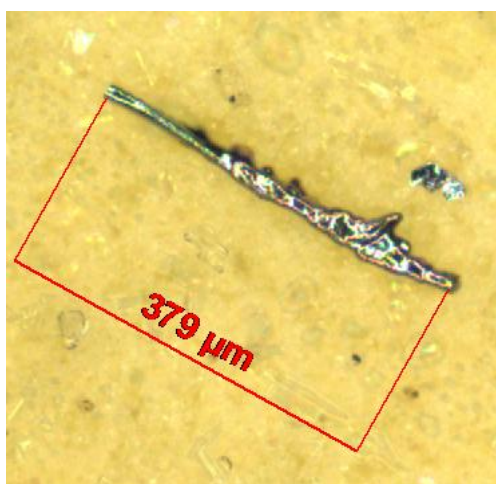
Taulukko 5.1. Letkuliittimien mittausarjojen keskiarvo.

Mittausarjojen keskiarvon CCC-koodi
CCC = A (D18 / E16 / F14 / G12 / H11 / I6 / J00 / K00)



Kuva 5.2. Ensimmäinen näyte letkuliittimen mittaussarjasta 1.

Kuva 5.3. Letkuliittimen mittaussarjan 1 irrotuskäyrä.



Kuva 5.4. Letkuliittimen mittaussarjasta 1 löytynyt hiukkanen.

Kuva 5.5. Letkuliittimen mittaussarjasta 1 löytynyt hiukkanen.

Mittauksissa irronneet hiukkaset olivat pääasiassa liittimien pinnoilta peräisin olevia metallihiukkasia. Molemmat tutkitut liittimet olivat puhtaustasoltaan lähellä toisiaan (liite 1) ja suurin löytynyt hiukkanen sijoittui puhtausluokkaan I ($400 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$).

Kaikki nollapuhtausnäytteet alittivat 10 % rajan, mutta niissä ilmeni liian suuria hiukkasia. Mittaussarjan 1 loppupuhtausnäytteestä löytyneet yhdeksän liian suurta hiukkasta viittaavat siihen, että pesukaapin huuhtelu viimeisen näytteen yhteydessä on jäänyt puutteelliseksi.

5.2 Kutistesuoja

Valmiin letkuasennelman tulppaamisessa käytettävät kutistesuojat haettiin tuotantosolulta. Niitä säilytetään kannellisissa laatikoissa niin, että kutistesuojat ovat ladottui-

na sisäkkäin. Tällaisina torneina niitä syötetään tulppauksen tekevään koneeseen aina syöttövaraston tyhjentyessä. Tutkimukseen otettiin kaksi kutistesuojaa. Kuva 5.6 esittää yksittäistä kutistesuojaa.



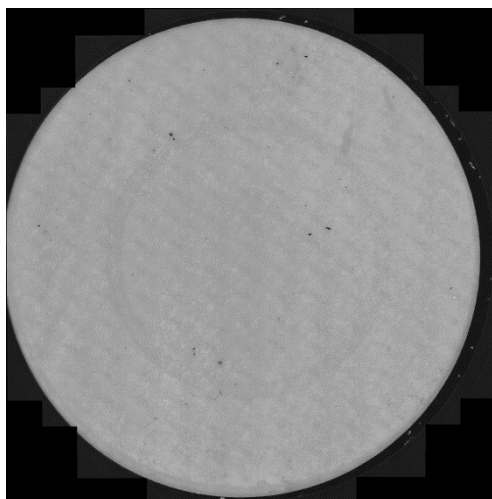
Kuva 5.6. Kutistesuoja.

Kutistesuojasta pestiin kaikki pinnat, koska pelkkää sisäpäätyä olisi ollut hankala tutkia. Lisäksi kutistesuojien ollessa varastoituna sisäkkäin, kosketti toisen sukan ulkopinta viereisen sisäpintaa, joten tällä perusteella kaikki pinnat olivat tarkastelun arvoisia. Komponentit pestiin samanlaisella pesuohjelmalla kuin liittimet ja kummastakin otettiin kaikki näytteet. Poikkeuksena jälkimmäinen kutistesuoja, jonka huuhtelussa käytimme pienempää tilavuusvirtaa (1,5 l/min). Syynä tähän oli se, että ensimmäinen kutistesuoja alkoi huuhtelun aikana repeytyä liian voimakkaan nestesuihkun johdosta. Yhdessä näytteessä kutistesuojan huuhteluun käytetty 0,5 l nestemäärä jaettiin siten, että 0,25 l varattiin sekä ulko- että sisäpintojen pesuun.

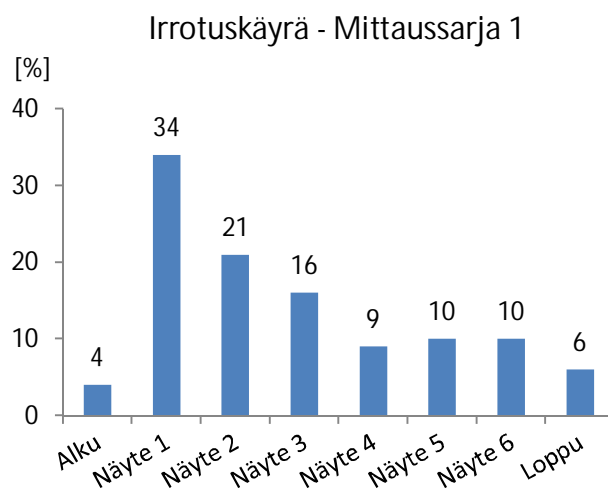
Taulukkoon 5.2 on koottu mittaussarjojen tuloksien keskiarvo suhteutettuna 1000 cm² märkäpinta-alaan. Kuvassa 5.7 on esitetty ensimmäisen näytteen kalvosuodatin mittausarjasta 1 ja kuvassa 5.8 vastaavan mittaussarjan irrotuskäyrä. Kutistesuojista irronneita hiukkasia on esitetty kuvissa 5.9 - 5.10.

Taulukko 5.2. Kutistesuojien mittaussarjojen keskiarvo.

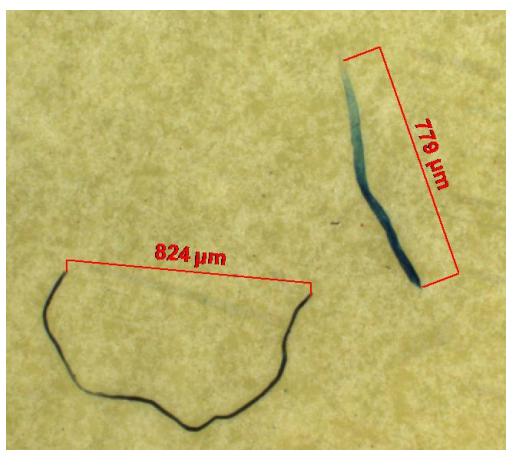
Mittaussarjojen keskiarvon CCC-koodi
CCC = A (D15 / E13 / F10 / G9 / H9 / I7 / J6 / K4)



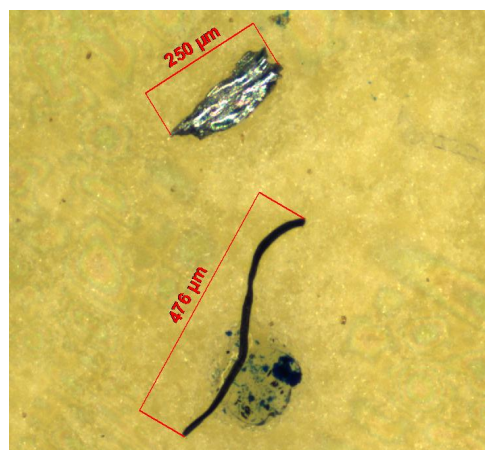
Kuva 5.7. Ensimmäinen näyte kutistesuojan mittaussarjasta 1.



Kuva 5.8. Kutistesuojan mittaussarjan 1 irrotuskäyrä.



Kuva 5.9. Kutistesuojan mittaussarjasta 1 löytyneet hiukkaset.



Kuva 5.10. Kutistesuojan mittaussarjasta 1 löytyneet hiukkaset.

Kutistesuojista irtosi jonkin verran kuitumaisia hiukkasia, jotka ovat tunnistettavissa kutistesuojan muovimateriaaliksi (kuva 5.9). Tämä olisi ehkä voitu välttää pienentämällä huuhtelusuihkun virtausta vielä enemmän. Toisaalta mittaussarjan 2 tulosten perusteella ei voida tehdä johtopäätöstä siitä, että virtauksen pienentäminen vähentäisi irronneiden hiukkasten lukumäärää. Muovikuitujen lisäksi näytteistä löytyi myös metallihiukkasia, joiden alkuperä on kyseenalainen. Kokonaishiukkasmäärältään kutistesuojat olivat kuitenkin varsin puhtaita, sillä kuudennen näytteen hiukkasmäärä ei alittanut vaadittua 10 %:ia kokonaishiukkasmäärästä kummassakaan mittaussarjassa. Kutistesuojien mittaussarjoissa kaikki nollapuhkausnäytteet olivat hyväksyttävällä tasolla.

5.3 Puhallustulppa

Puhallustulppien tapauksessa tehtiin vertailu, jossa tutkittiin tulppien puhtautta kahdesta kohteesta. Ensimmäinen paikka oli välivarasto, jossa niitä säilytettiin irtonaisina isoissa

kannellisissa muovilaatikoissa. Jälkimmäiset sijaitsivat solulla avolaatikossa, josta tulpanpuhalluskoneen täyttö suoritetaan. Tästä avolaatikosta valittiin tarkoituksella puhallustulpat laatikon pohjalta, jonne oli kertynyt jonkin verran epäpuhtauksia. Tavoitteena oli siis saada tutkimustietoa siitä, kuinka paljon tulpan (kuva 5.11) puhtaus kärsii, kun sitä säilytetään tuotantosolulla ennen puhalluskoneeseen laittoa. Mittauksia varten tulpia haettiin välivarastosta kaksi ja avolaatikosta kolme kappaletta.



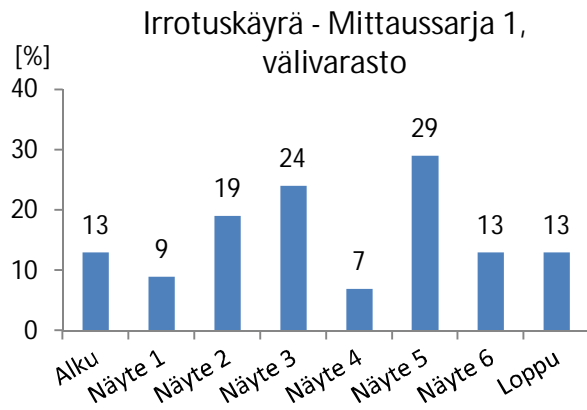
Kuva 5.11. Puhallustulppa.

Tulpat huuhdottiin kokonaan, jolloin kontrolloituna tilavuutena oli koko tulpan tilavuus. Jokaisen huuhdontakerran päätteeksi tulpat puristettiin kuivaksi irrotusnesteestä pesukaapin kumihanskoilla. Jokaisesta komponentista otettiin kuusi näytettä ja irrotusparametreina käytettiin samoja arvoja kuin edellisissäkin mittauksissa.

Taulukossa 5.3 on esitetty mittaussarjojen tuloksien keskiarvo suhteutettuna 1000 cm² märkäpinta-alaan. Kuvassa 5.12 on esitetty välivarastosta noudetun tulpan ensimmäisen mittaussarjan irrotuskäyrä ja kuvassa 5.13 kyseisen mittaussarjan näytteistä löytynyt hiukkanen. Vastaavat asiat avolaatikosta otetulle tulpalle on kuvattu kuvissa 5.14 – 5.15.

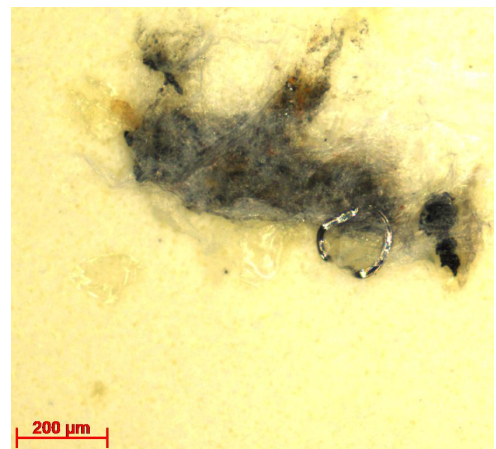
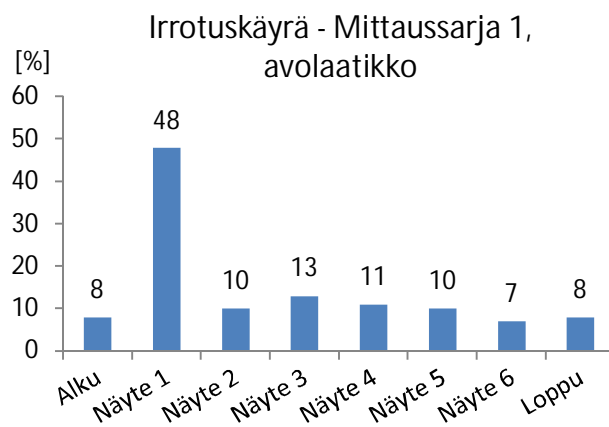
Taulukko 5.3. Puhallustulppien mittaussarjojen keskiarvot.

Kohde	Mittaussarjojen keskiarvon CCC-koodi
Välivarasto	CCC = A (D17 / E15 / F11 / G10 / H10 / I8 / J8 / K6)
Avolaatikko	CCC = A (D16 / E14 / F12 / G10 / H10 / I8 / J8 / K4)



Kuva 5.12. Välivarastosta noudetun tulpan mittaussarjan 1 irrotuskäyrä.

Kuva 5.13. Välivarastotulpan mittaussarjasta 1 löytynyt hiukkanen.



Kuva 5.14. Avolaatikosta otetun tulpan mittaussarjan 1 irrotuskäyrä.

Kuva 5.15. Avolaatikkotulpan mittaussarjasta 1 löytynyt hiukkanen.

Taulukon 5.3 mukaan välivarastossa olevat tulpat ovat epäpuhtaampia verrattuna avolaatikkoon. Ensinnäkin virhettä tekee se, että inhimillisen erehdyksen vuoksi välivarastosta otettiin tutkimukseen vain kaksi tulppaa. Tulppia olisi kannattanut ottaa kummas-takin kohteesta esimerkiksi kymmenen. Toiseksi välivarastotulppien ensimmäisen mit-taussarjan irrotuskäyrä on hyvin epäjohdonmukainen (kuva 5.12) ja sen nollapuhtaus-näytteissä esiintyi moninkertaisesti hiukkasia tavalliseen verrattuna. Huolellisemmalla testikaapin pesulla ennen mittauksien aloittamista olisi kyseinen tilanne voitu välttää alkupuhtauden osalta.

Välivarastotulppien toisenkaan mittaussarjan nollapuhtausnäytteet eivät täyttäneet 10 % rajaa, vaikka niiden absoluuttiset hiukkasmäärät olivat normaalilla tasolla. Tämä kertoo mitatun komponentin sisältämästä vähäisestä hiukkasmäärästä. Jos tutkittavia komponentteja olisi hankittu enemmän, olisi niitä voinut huuhdella yhtä aikaa useampia, jolloin testikaapin alkuhiukkastaso olisi jäänyt suhteessa pienemmäksi verrattuna kokonaishiukkasmäärään. Avolaatikosta otettujen tulppien mittaussarjojen nollapuhtausnäyt-teet läpäisivät vaatimuskriteerit.

Muiden mittaussarjojen irrotuskäyrät olivat pitkälti kuvan 5.14 kaltaisia. Ensimmäisten näytteiden hiukkasmäärät olivat vajaa puolet kokonaismäärästä, joidenka jälkeen loput näytteet olivat keskenään tasavahvoja, loppupuhtaustäytteet mukaan lukien. Välivaras-tosta tulneiden tulppien kokonaishiukkasmäärät (3700 ja 883 kpl) kertovat suuresta tulosten hajonnasta. Vastaavat luvut avolaatikkotulpille (1992, 885 ja 1652 kpl) vahvistavat sitä käsitystä, että luotettavampiin tuloksiin olisi vaadittu suurempi otos molemmista kohteista. Riippumatta puhallustulpan sijaintipaikasta, niistä jonkin verran suurehkoja epäpuhtaushiukkasia, joita on esitetty kuvissa 5.13 ja 5.15.

5.4 Letkun katkaisutavan vertailu

Mittauksia varten letkuja katkaistiin laboratoriossa sekä letkuasennelmia valmistavissa yrityksissä. Tarkoituksena oli ensinnäkin vertailla niin sanottujen kotikonstien hyvyttä suhteessa teolliseen katkaisuun. Toiseksi haluttiin tietoa siitä, mikä on ero koneellisessa katkaisussa, kun teränä käytetään joko sileää tai hammastettua terää. Taulukkoon 5.4 on kerätty kaikki ne katkaisumenetelmät, joille mittaukset tehtiin.

Taulukko 5.4. Tutkitut letkun katkaisumenetelmät.

Omatoimiset katkaisut	Teolliset katkaisut
Rautasaha	Yritys C: sileä terä
Kulmahiomakone	Yritys D: sileä terä
Kirves	Yritys D: hammastettu terä
	Yritys D: sileä terä + tulppapuhallus

Katkaisumenetelmiä oli yhteensä viisi. Lisäksi sileän terän katkaisu tehtiin kahdessa eri yrityksessä ja yhdelle katkaisusarjalle suoritettiin myös tulppapuhallus.

5.4.1 Letkukatkaisujen suoritus

Letkukatkaisuissa käytettiin niitä letkuasennelmia, joita käytettiin tämän diplomityöprojektin puhtausmittauksissa. Asennelmat olivat huuhdottuja mittauksien johdosta, jolloin niiden alkupuhtaus oli riittävän hyvä mittauksen suorittamiselle. Katkaisututkimuksessa käytettiin etupäässä puhtaustestikaapin liuotinhuuhdottuja letkuasennelmia, mutta lisäksi tarvittiin muutama testikoneikolla mitattu asennelma. Nämä huuhdottiin varmuuden vuoksi puhtaalla Hydac:in liuottimella vielä kertaalleen, jotta mahdolliset testikoneikon hydraulioöljyjäämät saatiin letkuista pois. Ennen katkaisuja letkuasennelman ulkopinta pyyhittiin vielä nukkaamattomalla liinalla.

Asennelmista katkottiin 20 cm mittaisia letkunpätkiä kolme kappaletta kullakin katkaisumenetelmällä. Yhdestä metrin pituisesta letkuasennelmasta saatiin aihio aina yhteen katkaisutapatutkimukseen. Katkaisutavan tuottamaa epäpuhtauden määrää tutkittiin siis

niin, että jokaiseen tutkittavaan letkuun tuli kaksi samalla menetelmällä katkaistua päätä.

Rautasaha

Rautasahassa käytettiin uutta terää, jonka hammastus oli keskikarkea (24 TPI). Letkuasennelma kiinnitettiin viilapenkkiin 20 x 20 x 3 mm kulmaraudan avulla, jolloin se pystyi siinä tukevasti kuitenkaan liikaa puristumatta. Asennelmaa pidettiin viilapenkissä aina niin päin, että tutkittava 20 cm letkuosuus jäi leukojen väliin. Tällöin se pysyi paikoillaan katkaisun jälkeen, jolloin epäpuhtaushiukkaset eivät päässeet karisemaan pois.

Heti katkaisun jälkeen letkunpää tulpattiin kierteellisellä 1/8 ” muovitulpalla, jonka jälkeen asennelma käännettiin ja katkaistiin toinen pää. Viilapenkin luonteesta johtuen pääsi loppuosa letkuasennelmasta tippumaan lattialle katkaisun jälkeen, joten seuraavaa letkupätkää ei voitu ottaa suoraan yhdellä katkaisulla. Sitä vastoin jäljelle jäänyt letkuasennelma puhallettiin paineilmalla puhtaaksi, jonka jälkeen suoritettiin uudet katkaisut. Aluksi sahattiin lyhyt osuus letkusta pois uuden katkaisupinnan saamiseksi. Jokaisen katkaisun välissä pyyhittiin sahanterä puhtaaksi liinalla.

Kulmahiomakone

Kulmahiomakoneessa käytettiin teräksen leikkaamiseen tarkoitettua laikkaa, jonka halkaisija oli 125 mm ja paksuus 1 mm. Koejärjestely noudatti samaa kaavaa kuin rautasahan kohdalla. Katkaisun syöttöliikkeen nopeus pidettiin kohtuullisen pienenä, ettei letku kuumentuisi liikaa.

Kirves

Kirveellä katkaisua varten rakennettiin kuvan 5.16 mukainen alusta, johon letkuasennelma kiinnitettiin muovisten putkistokannakkeiden avulla. Toisiinsa kiinniruvattujen 50 x 100 mm lankkujen päälle asetettiin muovi estämään puulastujen pääsy letkun sisälle.



Kuva 5.16. Letkun kiinnitys käytettäessä katkaisutyökaluna kirvestä.

Alusta sijoitettiin tukevan teräspöydän päälle. Jokainen katkaisukohta lyötiin kirveellä (varsi 60 cm) yhdellä voimakkaalla iskulla poikki. Liitinpään poistamisen jälkeen letku-aihiosta katkaistiin perätysten kaikki kolme tutkittavaa letkua. Asennelmaa siirrettiin jokaisen katkaisun jälkeen niin, että letkumateriaali oli molempien kiinnikkeiden alla. Niiden tehtävä oli pitää letku paikallaan lyönnin aikana, jottei katkennut letku singonnut pois lyöntivoiman vaikutuksesta. Tutkittavat letkut tulpattiin muovitulpilla heti katkaisun jälkeen.

Kirveen terän kuntoa seurattiin kokeen edetessä, eikä sen teroittamiseen ollut tarvetta. Jokaisen lyönnin jälkeen terä pyyhittiin puhtaaksi nukkaamattomalla liinalla.

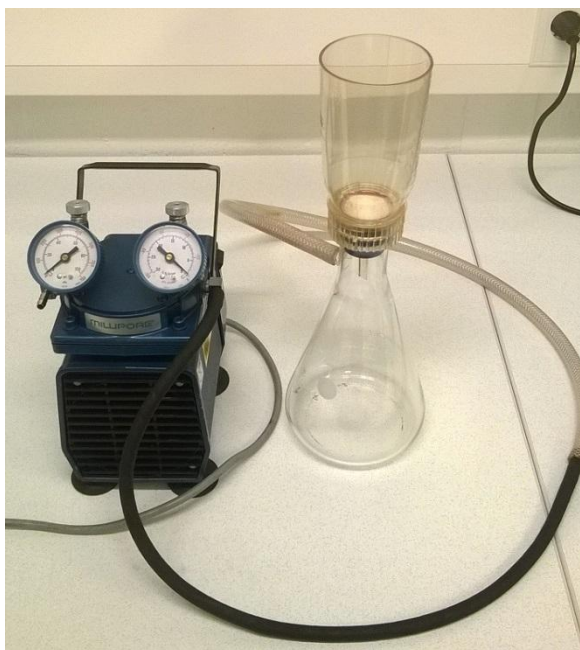
Katkaisut letkuja valmistavissa yrityksissä

Tutkimukseen osallistuneita yrityksiä pyydettiin katkaisemaan letkut heidän koneellisilla letkuleikkureillaan. Koneet olivat normaalissa tuotantokäytössä, eikä niihin tehty mitään valmistelevia toimenpiteitä ennen katkaisuja. Leikkurin käyttäjää pyydettiin katkaisemaan tarvittavat letkupätkät vakiintuneen käytännön mukaisesti tavallisilla työstöarvoilla.

Letkuja katkottiin kahdessa yrityksessä. Ensimmäisessä yrityksessä käytettiin konetta, jossa katkaisuterä oli sileäreunainen. Jälkimmäisessä yrityksessä koe suoritettiin kahdella katkaisukoneella, jossa ensimmäisessä oli sileä ja toisessa hammastettu terä. Lisäksi tässä yrityksessä tehtiin vielä kolmas mittaussarja, jossa sileäreunaisella terällä katkaistu letku puhallettiin tulppapuhalluksella kertaalleen.

5.4.2 Hiukkasten irrotus letkuista

Tutkittavien letkujen sisältämien suurien hiukkaslukumäärien johdosta ei ollut järkevää käyttää puhtaustestikaappia hiukkasten irrottamiseen. Lisäksi tällöin olisi ollut myös vaikeaa välttää huuhtomasta letkun ulkopintaa, joka tässä tutkimuksessa ei ollut tarkastelun kohteena. Sen sijaan käytimme hiukkasten irrottamiseen laitteistoa, joka on esitetty kuvassa 5.17.



Kuva 5.17. Letkujen katkaisututkimuksessa käytetty hiukkastenkeräyslaitteisto.

Laitteiston pääosat ovat kaatosuppilo, kalvosuodattimenpidike, tyhjiöpullo ja alipainepumppu. Käytetty irrotusneste johdetaan suppilon avulla kalvosuodattimelle, josta irrotusneste imetään alipaineen avulla tyhjiöpulloon. Kiertämällä suppilo auki päästään käsiksi kalvosuodattimeen.

Hiukkasten irrotusprosessi noudatti vakiintunutta kaavaa tässä työssä esiintyviin aikaisempiin mittauksiin nähden. Aluksi laitteistolle suoritettiin nollapuhtauskoee, jonka jälkeen jokaisesta tutkittavasta letkusta otettiin kuusi näytettä ja lopuksi nollapuhtauskoee. J Mittaussarjojen alussa kaatosuppilo puhdistettiin suodatetulla ($5\mu\text{m}$) paineilmalla.

Irrotusnesteenä käytettiin suodatettua erikoisbenssiiniä, jota ruiskutettiin annostelupullolla. Nollapuhtausnäytteissä irrotusnesteellä pestiin suppilon seinämät, jolloin saatiin selville laitteiston puhtaus. Varsinaiset näytteet otettiin niin, että letkua pidettiin pystyasennossa suppilon päällä samalla ruiskuttaen sen sisään nestettä. Ruiskutuksen aikana letkua pyöriteltiin tasaisesti, jotta huuhtelu olisi mahdollisimman tasaista. Letkun läpi valuva irrotusneste kuljetti mukanaan hiukkaset kaatosuppiloon. Käynnistämällä alipainepumppu muutamaksi sekunniksi saatiin irrotusneste imeytymään kalvosuodattimen läpi.

Suurin osa letkuista huuhdottiin samalla tavalla niiden katkaisutavasta riippumatta. Tulppien irrottamisen jälkeen ne huuhdottiin, jotta niiden kierteisiin tarttuneet hiukkaset tulivat analysointituloksiin mukaan. Yleensä ensimmäisessä näytteessä hiukkaset irrotettiin pelkästään letkua ravistelemalla, ilman irrotusnestettä. Irrotusnestettä annosteltiin silmämääräisesti ja sitä pyrittiin käyttämään sama määrä jokaiseen näytteeseen. Nestemäärä yhtä mittaussarjaa kohti oli noin 30 ml. Letkuja huuhdottiin vuoroin kummas-takin suunnasta.

Hiukkaset saatiin irrotettua letkuista pelkän nesteen avulla silmämääräisesti tarkasteltuna melko hyvin. Paremman lopputuloksen saamiseksi päätettiin loppupuolen mittaussarjoissa käyttää apuna rautalankaa. Suoralla, 1,0 mm vahvuisella hitsauslangalla saatiin irrotettua hiukkasia letkun seinämiltä, kun lankaa hangattiin pitkin letkun sisäpintaa. Etenkin yritysten koneellisesti katkaistujen letkujen kohdalla tämä oli tarpeellinen apukeino. Letkun huuhtomisen päätteeksi huudeltiin suppilon seinämät pienellä määrällä nestettä jokaisen näytteen kohdalla.

Tulppapuhallettua letkua huuhdeltaessa huomattiin, että kyseinen hiukkasten irrottamistapa ei ollut paras mahdollinen. Osa puhallustulpan letkun sisäputkesta työntämistä hiukkasista oli tarrautunut kiinni letkun suuaukkoon, josta hiukkaset irtosivat huuhtelun vaikutuksesta. Tämän vuoksi letkun sisäputken todellista puhtaustasoa ei saatu kunnolla mitattua. Sama ilmiö, eli katkaisupinnassa olevien hiukkasten osittainen mukaan tulo mittauksiin toistui muidenkin katkaisumenetelmien kohdalla, mutta niissä suhteellinen vaikutus lopputulokseen oli pienempi.

Erikoisbensiinin liuotinhöyryjen vuoksi hiukkasten irrotus letkuista suoritettiin vetokaapissa. Tämä johti siihen, että voimakas ilmavirtaus lennätti etenkin suuria hiukkasia pois kalvosuodattimen pinnalta siirrettäessä sitä Petri-maljaan.

Näytteet analysoitiin mikroskoopilla. Joidenkin näytteiden suuresta hiukkasmäärästä johtuen kuva-analyysiohjelmisto ei kyennyt erottelemaan kaikkia hiukkasia. Tämä aiheutti runsaasti käsityötä hiukkaslaskennassa. Tarkastuslaskennassa päähuomio kiinnitettiin suurempiin kokoluokkiin ($\geq 300 \mu\text{m}$).

5.4.3 Tulokset

Eri katkaisumenetelmien tulokset on koottu taulukkoon 5.5, jossa on esitetty mittaussarjojen tuloksien keskiarvo suhteutettuna 1000 cm^2 märkäpinta-alaan. Kuvissa 5.18 – 5.24 on suurennetut kuvat kalvosuodattimista siten, että jokaisen katkaisumenetelmän mittauksista on esitetty yksi näyte.

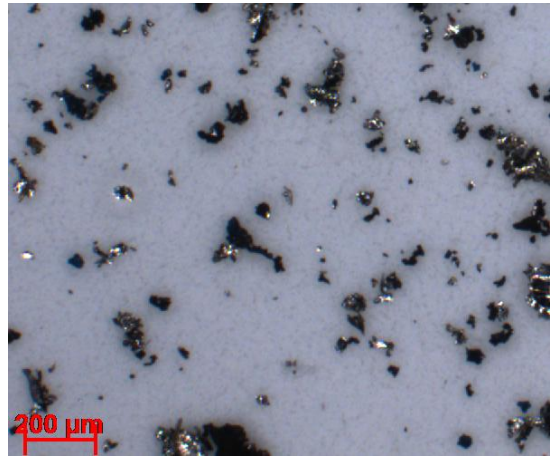
Taulukko 5.5. *Letkukatkaisujen mittaussarjojen keskiarvot.*

Katkaisumenetelmä	Mittaussarjojen keskiarvon CCC-koodi
Kulmahiomakone	CCC = A (D22 / E21 / F19 / G17 / H17 / I15 / J13 / K5)
Rautasaha	CCC = A (D20 / E19 / F17 / G15 / H15 / I10 / J9 / K5)
Kirves	CCC = A (D16 / E15 / F13 / G12 / H11 / I8 / J4 / K00)
Yritys C, sileä terä	CCC = A (D18 / E17 / F15 / G14 / H14 / I11 / J9 / K5)
Yritys D, sileä terä	CCC = A (D17 / E16 / F14 / G14 / H14 / I11 / J10 / K9)
Yritys D, hammastettu terä	CCC = A (D19 / E18 / F17 / G16 / H16 / I14 / J12 / K10)
Yritys D, sileä terä + puhallustulppa	CCC = A (D17 / E15 / F13 / G11 / H11 / I9 / J7 / K6)

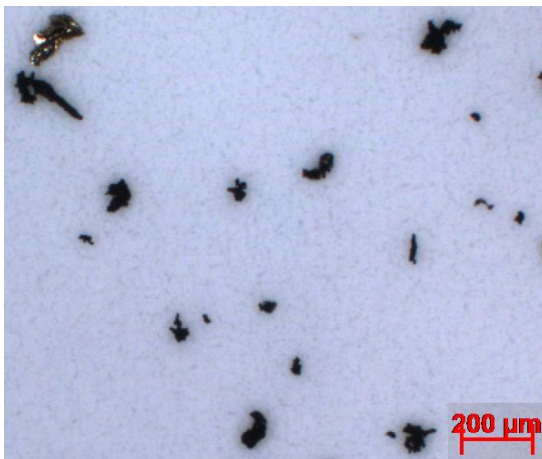
Mittaussarjojen nollapuhtausnäytteissä esiintyi suuria hiukkasia, etenkin loppupuhtauksissa. Kaatosuppilon huolelliseen huuhteluun viimeisen näytteen päätteeksi ei koettu tarpeelliseksi käyttää liian paljon aikaa, koska loppupuhtausnäytteiden hiukkasmäärät jäivät pieniksi verrattuna varsinaisiin näytteisiin. Suurin osa loppupuhtausnäytteissä olevista hiukkasista oli peräisin kaatosuppilon tiivistimenä toimivasta O-renkaasta, johon letkusta irronneita hiukkasia oli tarttunut huuhteluiden aikana. O-renkaan peseminen näytteiden yhteydessä ei ollut mahdollista. Vain 7/42 nollapuhtausnäytettä läpäisi vaatimusrajan (H 0) suurien hiukkasten osalta.



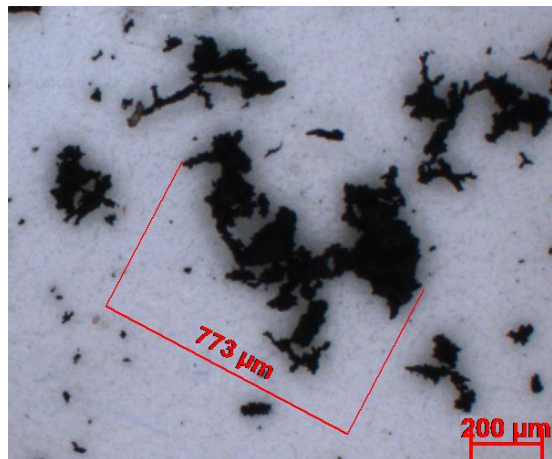
Kuva 5.18. Suurennos kulmahiomakoneella katkaistun letkun mittausarjan 2 näytteen 1 kalvosuodattimesta.



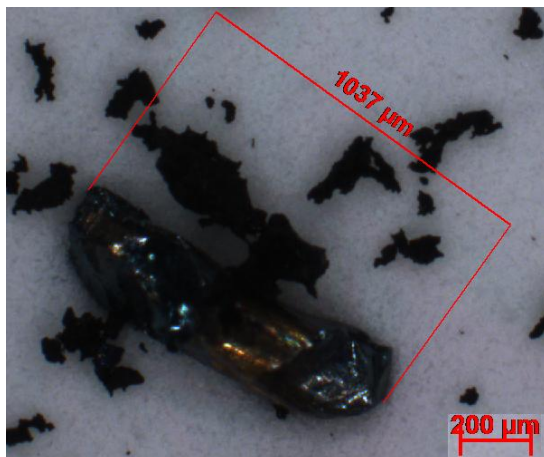
Kuva 5.19. Suurennos rautasahalla katkaistun letkun mittausarjan 2 näytteen 2 kalvosuodattimesta.



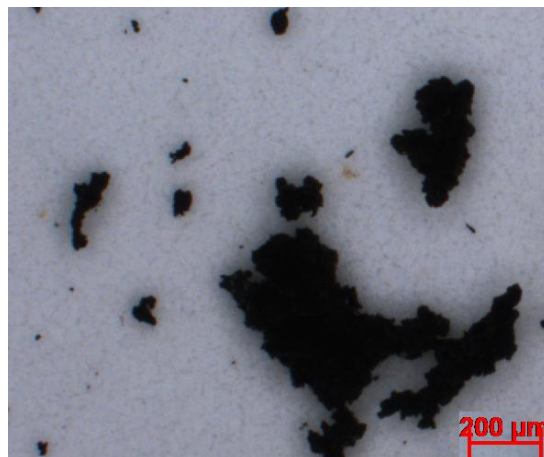
Kuva 5.20. Suurennos kirveellä katkaistun letkun mittausarjan 2 näytteen 2 kalvosuodattimesta.



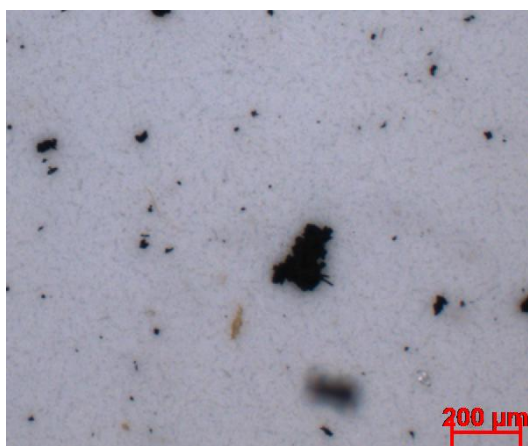
Kuva 5.21. Suurennos yrityksen C sileällä terällä katkaistun letkun mittausarjan 1 näytteen 2 kalvosuodattimesta.



Kuva 5.22. Suurennos yrityksen D hammastetulla terällä katkaistun letkun mittaussarjan 1 näytteen 2 kalvosuodattimesta.



Kuva 5.23. Suurennos yrityksen D sileällä terällä katkaistun letkun mittaussarjan 1 näytteen 3 kalvosuodattimesta.



Kuva 5.24. Suurennos yrityksen D sileällä terällä katkaistun ja tulppapuhalletun letkun mittaussarjan 1 näytteen 1 kalvosuodattimesta.

Verrattaessa omatoimisesti katkaistuja letkuja keskenään (taulukko 5.5) voidaan todeta, että kirveellä katkaisu tuotti vähiten hiukkasia letkuun. Ero kulmahiomakoneen katkaisulaikalla katkaistuun letkuun hiukkaskokoluokissa D – F on kuusi puhtausluokkaa, joka tarkoittaa $2^6 = 64$ kertaista eroa hiukkasmäärissä. Rautasahalla katkaisu sijoittui näiden kahden edellä mainitun väliin, ollen kuitenkin selvästi lähempänä kulmahiomakoneella katkotun letkun puhtaustuloksia.

Verrattaessa kuvia 5.18 ja 5.19 keskenään voidaan päätellä, että osa hiukkasista oli peräisin katkaisuterästä. Rautasahalla katkaistu letku sisälsi runsaasti metallihiukkasia, kun taas kulmahiomakonekatkaisun jäljiltä näytteen metallihiukkaspitoisuus oli pienempi. Sen sijaan siitä löytyi myös materiaalia, jonka voisi olettaa olevan peräisin katkaisulaikasta. Rautasaha repi runsaasti letkun kudossäikeitä, eikä katkaisupinnasta tullut siistiä.

Teollisesti katkaistujen letkujen tuloksia tarkasteltaessa ensimmäinen huomio on, etteivät ne yllä kirveellä katkaistun letkun puhtaustasoon. Syynä tähän on se, että letkuvalmistajien katkaisukoneissa on pyörivät terälaikat, jotka tuottavat irtomateriaalia enemmän kuin leikkaavaa kirveenterää. Jos verrataan yrityksen B tekemiä sileän ja hammastetun terän katkaisuja, niin nähdään, että ero on kauttaaltaan noin kahden puhtausluokan verran sileän terän hyväksi. Analysoitaessa hammastetun terän mittaussarjoja huomio kiinnittyi lukuisiin metallihiukkasiin, joita esiintyy kuvassa 5.22. Vastaavanlaisia, voimakkaasti lämmentyneitä hiukkasia ei muiden katkaisutapojen kohdalla ilmaantunut. Yrityksen C sileällä terällä katkaisema letkussa on puhtausluokasta riippuen yhtä paljon tai enemmän hiukkasia kuin yrityksen D vastaavalla terällä katkaistussa letkussa, mutta vähemmän kuin hammastetun terän tapauksessa.

Sileällä terällä katkaistun ja tulppapuhalletun letkun kohdalla havaitaan, että mittaustulokset eivät anna todellista kuvaa letkun puhtaustasosta. Tulosten mukaan tulppapuhalluksella ei ole ollenkaan vaikutusta D – kokoluokan ($25 \mu m \leq x < 50 \mu m$) hiukkasiin (taulukko 5.5). Verrattaessa tuloksia tämän työn alussa tutkittuihin letkuasennelmiin huomataan, että valmis tulppapuhallettu letkuasennelma sisältää komponenttina vähemmän hiukkasia kuin pelkkä 0,2 metrin mittainen tulppapuhallettu letku. Osittainen syy tähän on se, että katkaistuun letkunpäähän jääneet hiukkaset jäävät liitintä asennettaessa letkukaran ulkopuolelle. Näin ollen letkuasennelman märkäpinta ei käsitä letkun päätyä, eikä letkun sisäputkea päädyn läheisyydessä.

6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä diplomityössä tutkittiin letkuasennelmien teknistä puhtautta, sekä letkuasennelman liittämisen syntyviä epäpuhtauksia. Lisäksi suoritettiin puhtausmittauksia letkuasennelman valmistamisessa käytettäville komponenteille ja vertailtiin eri työmenetelmien puhtautta letkua katkaistaessa.

6.1 Letkuasennelmien mittaukset

Letku-Kompu-projektin asiakasyrityksillä teetettiin letkuasennelmia, joille tehtiin puhtausmittauksia Hydac CTU 1230 puhtaustestikaapilla ja IHA:n testipenkillä. Komponentit mitattiin ja mittaustulokset analysoitiin standardin ISO 16232 mukaisesti. Kustakin letkuasennelmasta otettiin kuusi puhtausnäytettä, jonka jälkeen kalvosuodattimille kerätyt hiukkasnäytteet analysoitiin mikroskoopilla.

Puhtaustestikaapilla suoritettut mittaukset puolsivat sitä käsitystä, että letkuasennelman valmistamisvaiheessa tehtävä tulppapuhallus poistaa merkittävästi epäpuhtaushiukkasia letkusta. Mittauksia voidaan luotettavana siltä osin, että suuria eroja eri mittaussarjojen välillä ei ollut. Toisaalta irrotusnesteen virtausnopeus jäi melko alhaiseksi, jolloin vaarana oli, etteivät kaikki letkuasennelman sisältämät hiukkaset irronneet huuhteluiden aikana.

Vertailun vuoksi saman valmistesarjan letkuasennelmille suoritettiin vastaavat mittaukset myös IHA:n toteuttamalla puhtausmittauslaitteistolla, joka on tarkoitettu kokoonpan-
tujen hydraulikomponenttien mittauksiin. Tulokset olivat osittain ristiriidassa puhtaustestikaappimittausten kanssa. Sen letkuvalmistajan letkuasennelmat, jotka sisälsivät testikaappimittausten perusteella vähemmän hiukkasia, olivat testipenkillä mitattuna selvästi kaappimittauksia likaisempia.

Toisen valmistajan letkuasennelmat taas olivat testipenkillä saatujen tulosten perusteella hieman puhtaampia verrattuna testikaappimittauksiin. Pienissä ja keskiuurissa hiukkaskokoluokissa ero oli korkeintaan yhden puhtausluokan verran, kun taas suurissa hiukkaskokooissa ero kasvoi kolmeen puhtausluokkaan. Syinä tulosten poikkeavuuteen voidaan pitää vähäistä tutkittavien komponenttien määrää ja käyttökokemuksen puutetta testikoneikosta. Hyväksi havaittujen irrotusparametrien puuttuminen johti siihen, ettei testikoneikolla saatuja tuloksia voida pitää täysin luotettavina.

Letkumittausten alkuvaiheessa syntynyt tarve tutkia kierrelitoksen vaikutusta mittaustuloksiin osoittautui aiheelliseksi. Testipenkillä suoritetuissa mittauksissa havaittiin, että

liitoksien avaamisen yhteydessä syntyviä yksittäisiä metallihiukkasia pääsi testijärjestelmään. Tällä kierreliitoksen avaamista tutkivan mittauksen tuloksilla voidaan osittain selittää letkumittauksissa esiintyneiden metallihiukkasten olemassaolo. Kokonaishiukkasmäärät olivat kuitenkin pääosin niin pieniä, etteivät nollapuhtausnäytteet alittaneet vaadittua 10 % rajaa. Pientä epävarmuutta kierreliitoksen mittaustuloksiin tuo se, että liitoksissa käytetyt kaksoisnipat eivät olleet enää uudenveroisessa kunnossa, jolloin niiden kierteiden pinnoissa on voinut olla käytöstä johtuvan kulumisen aiheuttamia säröjä.

Pikaliitinmittaukset suoritettiin kierreliitosmittausten yhteydessä. Tulokset olivat hyvin samankaltaisia kierreliitosmittausten kanssa, mutta suoran vertailun mahdollistamiseksi olisi pitänyt käyttää pienempiä, kyseiselle 3/8” –letkuasennelmille soveltuvia pikaliittimiä. Lisäksi pikaliitinparin kontrolloituna pinta-alana ei voitu käyttää hiukkasten synty pintaa, joten märkäpinta-alaan suhteutettu CCC-koodi ei anna oikeaa kuvaa pikaliitinparin puhtaustasosta.

Suoritettujen puhtausmittausten aikana testikoneikossa ilmeni haitallista värähtelyä analysointisäiliöön johtavassa putkessa, mikä vääristi joitakin mittaustuloksia. Värähtelyn syyksi epäiltiin väärän kokoista vastaventtiiliä. Tilanteen korjaamiseksi sen voisi tulevaisuudessa korvata pienemmän avautumispaineen tai läpäisyn omaavalla venttiilillä.

6.2 Letkuasennelman valmistamisen muut puhtausmittaukset

Projektin aikana päätettiin tutkia myös letkuliittimien, puhallustulppien ja kutistesuojien puhtautta käyttäen puhtaustestikaappia. Luotettavien tulosten kannalta suurin virhe tapahtui jo komponentteja noutaessa, koska niitä ei osattu varata tutkimukseen riittävästi. Pienehköjä komponentteja pitäisi huuhdella useampia yhtä aikaa, jotta niistä irronnut hiukkasmäärä erottuisi selkeästi nollapuhtaustasosta. Nyt etenkin kutistesuojien ja puhallustulppien tapauksessa kokonaishiukkasmäärät jäivät melko alhaisiksi, mikä osittain tietysti kertoo kyseisten komponenttien korkeasta puhtaustasosta.

Suurempi epävarmuustekijä puhallustulppamittausten kohdalla oli suuri tulosten hajonta, jota olisi saatu pienemmäksi huuhtelemalla useampia komponentteja samalla kertaa. Saatujen tulosten perusteella on vaikeaa tehdä johtopäätöksiä välivarastossa ja tuotantosolun avolaatikossa säilytettävien tulppien puhtaustason eroista. Mittaustulosten mukaan avolaatikosta otetut puhallustulpat olisivat puhtaampia verrattuna välivarastossa säilytettäviin, vaikka kaikki avolaatikkoon laitettavat tulpat kulkevat välivaraston kautta.

Letkun katkaisutavan vertailua varten katkottiin letkuja laboratoriossa rautasahalla, kulmahiomakoneella ja kirveellä. Lisäksi saatiin vertailuun mukaan kahden letkuasennelmia valmistavan yrityksen koneellisesti katkottuja letkuja. Saatuja tuloksia voidaan pitää melko luotettavana lukuun ottamatta tulppapuhallettua letkua. Luotettavuutta puo- lustaa se, että saman katkaisutavan keskinäisten mittaussarjojen hajonta oli melko vä-

häinen. Epävarmuustekijöistä suurin ilmeni kalvosuodattimia analysoitaessa, jolloin näytteiden sisältämien runsaiden hiukasmäärien takia yksittäisten hiukkasten erottelu oli haastavaa. Toiseksi aivan kaikkia hiukkasia ei saatu irrotettua letkujen sisäpinnalta, koska painehuuhtelua ei voitu käyttää.

Tulppapuhalletun letkun tapauksessa kyseinen mittausjärjestely ei antanut todellista kuvaa letkun sisäputken puhtaudesta. Puhallustulpan syrjäyttämät hiukkaset jäivät osittain kiinni letkun katkaisupintaan, josta niitä huuhtoutui kalvosuodattimelle. Sama ilmiö toistui myös muiden letkujen kohdalla, mutta niissä katkaisupinnasta mukaan tulleiden hiukkasten osuus kokonaishiukasmäärästä jäi verrattain pieneksi.

Suurelle osalle tämän projektin aikana suoritetuista mittauksista oli yhteistä se, että nollapuhtausnäytteissä esiintyi liian paljon tai liian suuria hiukkasia. Vastaavaa ongelmaa on esiintynyt aikaisemmissakin IHA:lla suoritetuissa puhtausmittauksissa [6, s. 128; 7, s. 63]. Alkupuhtausnäytteet on mahdollista saada hyväksyttävälle tasolle paremmalla testilaitteiston huuhtelulla, kun taas loppupuhtausnäytteissä kyseeseen tulee tehokkaampien irrotusparametrien ja –menetelmien käyttäminen komponenttien huuhteluissa.

7. YHTEENVETO

Hydraulijärjestelmän sisältämällä epäpuhtauksilla on suuri vaikutus sen toimintaan ja luotettavuuteen. Komponenttien valmistamisen yhteydessä saattaa niihin jäädä suuria hiukkasia, jotka voivat aiheuttaa toimintahäiriöitä järjestelmään sen elinkaaren alkuvaiheessa. Komponenttien teknisen puhtauden tutkimisella pyritään selvittämään, millälaisia epäpuhtaushiukkasia vasta valmistetut komponentit sisältävät.

Tämän diplomityön alussa esiteltiin standardisarjaa ISO 16232, joka antaa ohjeet hydraulijärjestelmien komponenttien puhtauden mittaamiseen. Tutkimuksen pääpainon ollessa letkuasennelmien mittauksissa käsiteltiin seuraavaksi letkuasennelmien valmistusprosessia.

Puhtausmittauksia tehtiin letkuasennelmille sekä tutkittiin kierre- ja pikaliitoksen avaamisessa syntyviä epäpuhtaushiukkasia. Lisäksi suoritettiin puhtausmittauksia letkuasennelman valmistamisessa käytettäville letkuliittimille, kutistesuojille ja puhallustulpille. Lopuksi tehtiin vertailu, jossa letkuja katkottiin eri työmenetelmillä, tavoitteena tutkia kunkin katkaisutavan tuottamaa hiukkasmäärää.

Letkuasennelmista hiukkaset irrotettiin standardisarjan viidennen osan käsittelemällä testipenkkimenetelmällä. Vertailun vuoksi kyseiset mittaukset suoritettiin kahdella eri puhtausmittauslaitteistolla. Letkuliittimet, kutistesuojat ja puhallustulpat huuhdeltiin standardisarjan osan kolme käsittelemällä painehuuhtelumenetelmällä käyttäen mittauslaitteistona puhtaustestikaappia. Letkujen katkaisuverailun mittaukset tehtiin hiukkas-tenkeräyslaitteistolla, jossa irrotusprosessi jäljitteli painehuuhtelumenetelmää. Kaikissa mittauksissa irronneet epäpuhtaudet erotettiin kalvosuodattimelle, jonka jälkeen hiukkaset laskettiin mikroskooppianalyysillä.

Letkuasennelmien puhtaustuloksissa oli jonkin verran eroa riippuen käytetystä mittauslaitteistosta. Puhtaustestikaapilla saatuja tuloksia voidaan pitää luotettavampina johtuen osittain siitä, että testipenkillä ei ole vielä saatu riittävästi käyttökokemusta. Molemmilla laitteistoilla saadut tulokset kuitenkin osoittivat, että letkuasennelman tulppapuhalluksella kyetään poistamaan merkittävä määrä hiukkasista.

Testipenkillä suoritettujen letkumittausten ohessa saatiin selville, että kierrelitännän avaamisen yhteydessä järjestelmään pääsi satunnaisia metallihiukkasia, jotka olivat peräisin liitoksesta. Puhtauden kannalta parempi tapa on sijoittaa kierrelitännä vaakatasoon, jolloin kierteistä irtoavat hiukkaset eivät pääse yhtä helposti järjestelmään. Samalla tutkittiin myös pikaliitinparin avaamisen yhteydessä syntyvien epäpuhtaushiuk-

kasten määrää. Tulosten mukaan pikaliittimen aukaisu tuottaa suunnilleen saman verran hiukkasia kierrelitokseen verrattuna. Mittauksissa käytetty pikaliitinkoko oli kuitenkin tarkoitukseen nähden liian suuri, mikä osittain heikentää tulosten vertailukelpoisuutta.

Puhtaustestikaapilla suoritettujen muiden komponenttien mittaukset onnistuivat kohtalaisesti. Tulosten luotettavuutta huonontaa tutkittujen komponenttien vähäinen lukumäärä. Letkuliittimistä löytyi jonkun verran metallihiukkasia, jotka voivat olla peräisin joko liittimestä itsestään tai syntyä suljetussa yhteispakkauksessa olevien useiden liittimien keskinäisestä hankauksesta. Kutistesuojista irtosi huuhteluiden aikana pääasiassa vain niiden omaa muovimateriaalia, mikä kertoo tehokkaasta huuhtelusuihkusta ja kutistesuojien vähäisestä epäpuhtauksien määrästä. Puhallustulppien puhtausmittaukset epäonnistuivat komponenttien pienen lukumäärän vuoksi, eikä saaduista tuloksista voida tehdä johtopäätöksiä.

Letkun katkaisutavan vertailun tuottamat tulokset tukivat sitä käsitystä, että selkeästi puhtain katkaisutulos saavutetaan käyttämällä kirvestä. Sitä vastoin rautasahan taa kulmahiomakoneen käyttämistä letkun katkaisemiseen tulisi välttää. Jotta voitaisiin saada tarkempaa tietoa koneellisen katkaisun tuottamasta hiukkasmäärästä, olisi myös syytä vertailla katkaisutyötä sekä uusilla, että kuluneilla terillä. Katkaisuvertailun tulokset ovat melko luotettavia tulppapuhallettua letkua lukuun ottamatta.

Diplomityön tuloksena tehtiin puhtausmittauksia letkuasennelmille sekä niiden valmistukseen liittyville komponenteille ja työvaiheille. Lisäksi saatiin käyttökokemusta IHA:lla rakennetusta puhtausmittauslaitteistosta, jolla on tarkoitus jatkaa hydraulikomponenttien teknisen puhtauden mittauksia tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- [1] ISO 16232 - 1. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 1: Vocabulary. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 15 p.
- [2] Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. Hydraulitekniikka. Helsinki 2008, WSOY Oppimateriaalit. 487 s.
- [3] Kuosku, M. Hydraulikomponenttien puhtaustason määrittäminen. Kandidaatintyö. Tampere 2010. Tampereen teknillinen yliopisto, Hydrauliiikan ja automatiikan laitos. 44 s.
- [4] Rinkinen, J. Hydrauliiikan puhtaustandardien hyödyntäminen suomalaisessa konepajateollisuudessa. Fluid Finland 9(2010). s. 18-23.
- [5] Rinkinen, J. Hydraulikomponenttien puhtausvalvontastandardien nykytilanne 2014. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, Suomi, 4.4.2014. 2014.
- [6] Pekkonen, J. Hydraulikomponenttien puhtausmittauslaitteiston suunnittelu. Diplomityö. Tampere 2012. Tampereen teknillinen yliopisto, Hydrauliiikan ja automatiikan laitos. 134 s.
- [7] Virtanen, H. Komponenttipuhtauden mittauspalveluiden kehittäminen. Diplomityö. Tampere 2015. Tampereen teknillinen yliopisto, Hydrauliiikan ja automatiikan laitos. 83 s.
- [8] Kuosku, M. Hydrauliiikan komponenttipuhtauslaboratorion varustelu ja koemittaukset. Diplomityö. Tampere 2011. Tampereen teknillinen yliopisto, Hydrauliiikan ja automatiikan laitos. 114 s.
- [9] ISO 18413. Hydraulic fluid power - Cleanliness of parts and components - Inspection document and principles related to contaminant collection, analysis and data reporting. Switzerland 2002, International Organization of Standardization. 28 p.
- [10] ISO 16232 - 3. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 3: Method of extraction of contaminants pressure rising. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 15 p.
- [11] ISO 16232 - 5. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 5: Method of extraction of contaminants by functional test bench. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 18 p.
- [12] ISO 16232 - 7. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 7: Particle sizing and counting by microscopic analysis. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 22 p.
- [13] ISO 16232 - 10. Road vehicles - Cleanliness of components of fluid circuits - Part 10: Expression of results. Switzerland 2007, International Organization of Standardization. 19 p.

- [14] Virta, S. Hydrauliputkistot. Helsinki 2010, KP-Media Oy. 124 s.
- [15] Verband der Automobilindustrie, V. Quality Management in the Automotive Industry: Part 2 -Technical cleanliness in assembly. English edition ed. 2010, 196 p.

LIITE 1, 1/3. HIUKKASLASKENNAN TULOKSET PUHTAUSMIT- TAUKSISSA

Letkuasennelma, yritys A, CTU 1230

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D3866 / E458 / F49 / G20 / H15 / I2 / J1 / K1)
2	CCC = N (D1368 / E325 / F46 / G13 / H11 / I1 / J1 / K0)
3	CCC = N (D1069 / E223 / F18 / G5 / H4 / I1 / J1 / K0)
Keskiarvo	CCC = N (D2101 / E335 / F38 / G13 / H10 / I1 / J1 / K0)
Keskiarvo	CCC = A (D13 / E11 / F7 / G6 / H5 / I2 / J2 / K0)

Letkuasennelma, yritys B, CTU 1230

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D6693 / E3341 / F787 / G324 / H298 / I37 / J16 / K2)
2	CCC = N (D9872 / E4501 / F1232 / G465 / H424 / I40 / J19 / K3)
Keskiarvo	CCC = N (D8283 / E4371 / F1010 / G395 / H361 / I39 / J18 / K3)
Keskiarvo	CCC = A (D15 / E14 / F12 / G11 / H11 / I7 / J6 / K4)

Letkuasennelma, yritys A, Testipenkki

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D3873 / E1069 / F121 / G44 / H25 / I2 / J1 / K0)
2	CCC = N (D2161 / E714 / F84 / G30 / H25 / I4 / J4 / K1)
Keskiarvo	CCC = N (D3017 / E892 / F103 / G37 / H25 / I3 / J3 / K1)
keskiarvo	CCC = A (D14 / E12 / F9 / G7 / H7 / I4 / J4 / K2)

Letkuasennelma, yritys B, Testipenkki

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D7689 / E3894 / F960 / G350 / H302 / I28 / J4 / K1)
2	CCC = N (D8945 / E4809 / F1495 / G739 / H729 / I95 / J26 / K2)
Keskiarvo	CCC = N (D8317 / E4352 / F1228 / G545 / H516 / I62 / J15 / K2)
Keskiarvo	CCC = A (D15 / E14 / F11 / G10 / H10 / I6 / J4 / K1)

Kierreläitos, 10 krt auki/kiinni

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D1028 / E394 / F29 / G13 / H5 / I1 / J0 / K0)
2	CCC = N (D565 / E170 / F26 / G9 / H5 / I1 / J0 / K0)
3	CCC = N (D1248 / E412 / F42 / G10 / H6 / I0 / J0 / K0)
Keskiarvo	CCC = N (D947 / E325 / F32 / G11 / H5 / I1 / J0 / K0)
Keskiarvo	CCC = A (D17 / E15 / F12 / G11 / H9 / I7 / J00 / K00)

Pikaliitos, 10 krt auki/kiinni

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D1569 / E504 / F61 / G10 / H13 / I2 / J0 / K0)
2	CCC = N (D1045 / E304 / F37 / G5 / H3 / I0 / J0 / K0)
3	CCC = N (D776 / E267 / F20 / G4 / H0 / I2 / J0 / K0)
Keskiarvo	CCC = N (D1130 / E358 / F49 / G6 / H5 / I1 / J0 / K0)
Keskiarvo	CCC = A (D18 / E16 / F13 / G10 / H10 / I7 / J00 / K00)

LIITE 1, 2/3. HIUKKASLASKENNAN TULOKSET PUHTAUSMITTAUKSISSA

Letkuliitin

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D4828 / E1140 / F172 / G53 / H26 / I1 / J0 / K0)
2	CCC = N (D4519 / E1231 / F177 / G42 / H17 / I0 / J0 / K0)
Keskiarvo	CCC = N (D4674 / E1186 / F175 / G48 / H22 / I1 / J0 / K0)
Keskiarvo	CCC = A (D18 / E16 / F14 / G12 / H11 / I6 / J00 / K00)

Kutistesuoja

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D1392 / E438 / F86 / G28 / H18 / I5 / J3 / K1)
2	CCC = N (D1622 / E421 / F73 / G25 / H24 / I6 / J3 / K0)
Keskiarvo	CCC = N (D1507 / E430 / F80 / G27 / H21 / I6 / J3 / K1)
Keskiarvo	CCC = A (D15 / E13 / F10 / G9 / H9 / I7 / J6 / K4)

Puhallustulppa välivarastosta

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D2912 / E669 / F64 / G20 / H19 / I7 / J6 / K2)
2	CCC = N (D705 / E155 / F13 / G3 / H6 / I1 / J0 / K0)
Keskiarvo	CCC = N (D1809 / E412 / F39 / G12 / H13 / I4 / J3 / K1)
Keskiarvo	CCC = A (D17 / E15 / F11 / G10 / H10 / I8 / J8 / K6)

Puhallustulppa avolaatikosta

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D1480 / E407 / F54 / G24 / H23 / I3 / J1 / K0)
2	CCC = N (D641 / E186 / F33 / G14 / H6 / I3 / J1 / K1)
3	CCC = N (D1168 / E397 / F50 / G17 / H12 / I2 / J6 / K0)
Keskiarvo	CCC = N (D1096 / E330 / F46 / G18 / H14 / I3 / J3 / K0)
Keskiarvo	CCC = A (D16 / E14 / F12 / G10 / H10 / I8 / J8 / K4)

Letkukatkaisu, Kulmahiomakone

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D156082 / E75758 / F19750 / G7790 / H7804 / I1584 / J761 / K361)
2	CCC = N (D172865 / E84356 / F21927 / G8604 / H8846 / I1801 / J1042 / K528)
3	CCC = N (D125707 / E68346 / F18231 / G7010 / H6585 / I1231 / J656 / K90)
Keskiarvo	CCC = N (D151551 / E76153 / F19969 / G7801 / H7745 / I1539 / K326)
Keskiarvo	CCC = A (D22 / E21 / F19 / G17 / H17 / I15 / J13 / K5)

Letkukatkaisu, Rautasaha

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D33137 / E18632 / F4282 / G1455 / H1084 / I76 / J10 / K1)
2	CCC = N (D38712 / E21182 / F5591 / G1974 / H1655 / I155 / J42 / K2)
3	CCC = N (D32231 / E15341 / F3677 / G1353 / H1168 / I130 / J41 / K2)
Keskiarvo	CCC = N (D34693 / E18385 / F4517 / G1594 / H1302 / I54 / J31 / K2)
Keskiarvo	CCC = A (D20 / E19 / F17 / G15 / H15 / I10 / J9 / K5)

LIITE 1, 3/3. HIUKKASLASKENNAN TULOKSET PUHTAUSMIT- TAUKSISSA

Letkukatkaisu, Kirves

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D4735 / E2463 / F526 / G141 / H115 / I2 / J1 / K0)
2	CCC = N (D2706 / E1599 / F388 / G124 / H98 / I9 / J2 / K0)
3	CCC = N (D2294 / E1472 / F381 / G154 / H152 / I16 / J1 / K0)
Keskiarvo	CCC = N (D3245 / E1845 / F432 / G140 / H122 / I9 / J1 / K0)
Keskiarvo	CCC = A (D16 / E15 / F13 / G12 / H11 / I8 / J4 / K00)

Letkukatkaisu, Yritys C, sileä terä

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D15681 / E6630 / F1862 / G750 / H771 / I101 / J24 / K1)
2	CCC = N (D9223 / E5395 / F1559 / G673 / H621 / I68 / J11 / K1)
3	CCC = N (D8482 / E4677 / F1219 / G529 / H492 / I64 / J25 / K4)
Keskiarvo	CCC = N (D11129 / E5567 / F1547 / G651 / H628 / I78 / J20 / K2)
Keskiarvo	CCC = A (D18 / E17 / F15 / G14 / H14 / I11 / J9 / K5)

Letkukatkaisu, Yritys D, hammastettu terä

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D21947 / E11830 / F3708 / G1872 / H2592 / I603 / J262 / K66)
2	CCC = N (D26822 / E14964 / F5030 / G2385 / H3110 / I644 / J187 / K31)
3	CCC = N (D15162 / E10654 / F3779 / G1965 / H2710 / I608 / J142 / K13)
Keskiarvo	CCC = N (D21310 / E12483 / F4172 / G2074 / H2804 / I618 / J197 / K37)
Keskiarvo	CCC = A (D19 / E18 / F17 / G16 / H16 / I14 / J12 / K10)

Letkukatkaisu, Yritys D, sileä terä

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D5804 / E2591 / F852 / G410 / H601 / I107 / J57 / K19)
2	CCC = N (D5856 / E3331 / F1207 / G531 / H674 / I105 / J43 / K16)
3	CCC = N (D5072 / E2587 / F930 / G417 / H574 / I97 / J25 / K14)
Keskiarvo	CCC = N (D5577 / E2836 / F996 / G543 / H616 / I103 / J42 / K16)
Keskiarvo	CCC = A (D17 / E16 / F14 / G14 / H14 / I11 / J10 / K9)

Letkukatkaisu, Yritys D, sileä terä ja puhallustulppa

Mittausarja	Puhtauskoodi
1	CCC = N (D4148 / E1352 / F288 / G89 / H103 / I27 / J8 / K3)
2	CCC = N (D5340 / E1919 / F424 / G141 / H157 / I26 / J13 / K3)
3	CCC = N (D3545 / E1155 / F199 / G91 / H99 / I16 / J2 / K2)
Keskiarvo	CCC = N (D4344 / E1475 / F304 / G107 / H120 / I23 / J8 / K3)
Keskiarvo	CCC = A (D17 / E15 / F13 / G11 / H11 / I9 / J7 / K6)

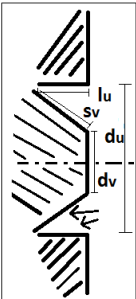
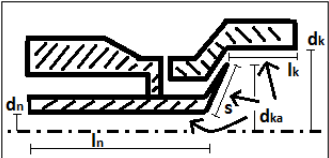
LIITE 2, 1/2. HIUKKASLASKENNAN TULOKSET NOLLAPUHTAUSNÄYTTEISSÄ

Mittausarja	Alun nollapuhtausnäyte	Lopun nollapuhtausnäyte
Letkuasennelma 1, yritys A, CTU 1230	CCC = N (D171 /E31 / F2 / G0 / H2 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D73 /E23 / F2 / G1 / H0 / I0 / J0 /K0)
Letkuasennelma 2, yritys A, CTU 1230	CCC = N (D114 /E19 / F4 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D130 /E23 / F7 / G2 / H0 / I0 / J0 /K0)
Letkuasennelma 3, yritys A, CTU 1230	CCC = N (D321 /E58 / F5 / G7 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D103 /E20 / F3 / G1 / H0 / I0 / J0 /K0)
Letkuasennelma 1, yritys B, CTU 1230	CCC = N (D167 /E49 / F3 / G0 / H1 / I0 / J1 /K0)	CCC = N (D57 /E19 / F2 / G0 / H2 / I0 / J0 /K0)
Letkuasennelma 2, yritys B, CTU 1230	CCC = N (D71 /E10 / F1 / G0 / H2 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D66 /E13 / F2 / G2 / H1 / I1 / J0 /K0)
Letkuasennelma 1, yritys A, testipenkki	CCC = N (D82 /E32 / F2 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D106 /E55 / F15 / G3 / H1 / I0 / J0 /K0)
Letkuasennelma 2, yritys A, testipenkki	CCC = N (D123 /E17 / F2 / G0 / H0 / I0 / J1 /K0)	CCC = N (D87 /E43 / F4 / G2 / H0 / I0 / J0 /K0)
Letkuasennelma 1, yritys B, testipenkki	CCC = N (D45 /E25 / F1 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D195 /E44 / F4 / G2 / H4 / I0 / J0 /K0)
Letkuasennelma 2, yritys B, testipenkki	CCC = N (D62 /E15 / F3 / G1 / H2 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D222 /E97 / F23 / G4 / H3 / I2 / J0 /K0)
Kierreltiitos 1, 10 kertaa auki/kiinni	CCC = N (D72 /E33 / F5 / G1 / H2 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D130 /E50 / F6 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)
Kierreltiitos 2, 10 kertaa auki/kiinni	CCC = N (D78 /E28 / F6 / G0 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D468 /E158 / F15 / G2 / H3 / I1 / J0 /K0)
Kierreltiitos 3, 10 kertaa auki/kiinni	CCC = N (D151 /E47 / F2 / G1 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D520 /E149 / F6 / G1 / H0 / I0 / J0 /K0)
Pikaliitos 1, 10 kertaa auki/kiinni	CCC = N (D117 /E38 / F2 / G1 / H3 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D218 /E58 / F9 / G2 / H0 / I0 / J0 /K0)
Pikaliitos 2, 10 kertaa auki/kiinni	CCC = N (D110 /E38 / F3 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D123 /E38 / F2 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)
Pikaliitos 3, 10 kertaa auki/kiinni	CCC = N (D40 /E20 / F3 / G0 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D69 /E27 / F4 / G2 / H0 / I0 / J0 /K0)
Letkuliitin 1	CCC = N (D204 /E39 / F6 / G3 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D122 /E26 / F7 / G3 / H8 / I1 / J0 /K0)
Letkuliitin 2	CCC = N (D148 /E34 / F3 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D165 /E37 / F9 / G2 / H2 / I0 / J0 /K0)
Kutistesuoja 1	CCC = N (D65 /E13 / F1 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D84 /E33 / F1 / G1 / H0 / I0 / J0 /K0)
Kutistesuoja 2	CCC = N (D69 /E33 / F0 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D86 /E6 / F0 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)
Puhallustulppa 1, välivastosta	CCC = N (D405 /E82 / F9 / G0 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D378 /E82 / F5 / G2 / H1 / I0 / J0 /K0)
Puhallustulppa 2, välivastosta	CCC = N (D188 /E27 / F4 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D87 /E20 / F4 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)
Puhallustulppa 1, avolaatikosta	CCC = N (D121 /E31 / F3 / G1 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D123 /E21 / F3 / G1 / H0 / I0 / J0 /K0)
Puhallustulppa 2, avolaatikosta	CCC = N (D19 /E6 / F4 / G4 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D66 /E13 / F2 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)
Puhallustulppa 3, avolaatikosta	CCC = N (D105 /E22 / F7 / G5 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D84 /E12 / F1 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)

LIITE 2, 2/2. HIUKKASLASKENNAN TULOKSET NOLLAPUHTAUSNÄYTEISSÄ

Mittausarja	Alun nollapuhtausnäyte	Lopun nollapuhtausnäyte
Letkukatkaisu 1, kulmahiomakone	CCC = N (D135 /E35 / F1 / G2 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D2749 /E1338 / F294 / G81 / H75 / I9 / J5 /K1)
Letkukatkaisu 2, kulmahiomakone	CCC = N (D730 /E292 / F56 / G8 / H3 / I0 / J1/K0)	CCC = N (D4066 /E2158 / F444 / G183 / H122 / I19 / J8 /K0)
Letkukatkaisu 3, kulmahiomakone	CCC = N (D1106 /E358 / F64 / G15 / H5 / I1 / J0 /K0)	CCC = N (D1764 /E836 / F227 / G78 / H60 / I4 / J4 /K2)
Letkukatkaisu 1, rautasaha	CCC = N (D774 /E232 / F54 / G21 / H6 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D979 /E375 / F64 / G19 / H4 / I0 / J1 /K0)
Letkukatkaisu 2, rautasaha	CCC = N (D370 /E386 / F20 / G2 / H5 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D1213 /E593 / F166 / G60 / H61 / I9 / J2 /K0)
Letkukatkaisu 3, rautasaha	CCC = N (D263 /E140 / F16 / G4 / H3 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D622 /E254 / F71 / G30 / H22 / I6 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 1, kirves	CCC = N (D326 /E117 / F14 / G3 / H2 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D175 /E103 / F13 / G4 / H2 / I1 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 2, kirves	CCC = N (D178 /E73 / F4 / G1 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D173 /E69 / F8 / G9 / H5 / I0 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 3, kirves	CCC = N (D121 /E29 / F5 / G2 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D191 /E85 / F13 / G5 / H0 / I0 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 1, yrittäjä C, sileä terä	CCC = N (D49 /E32 / F3 / G1 / H2 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D142 /E62 / F4 / G3 / H0 / I0 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 2, yrittäjä C, sileä terä	CCC = N (D147 /E62 / F15 / G6 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D238 /E111 / F21 / G10 / H7 / I1 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 3, yrittäjä C, sileä terä	CCC = N (D34 /E11 / F5 / G1 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D244 /E107 / F8 / G6 / H4 / I0 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 1, yrittäjä D, hammast. terä	CCC = N (D40 /E21 / F2 / G2 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D363 /E189 / F59 / G27 / H36 / I10 / J6 /K1)
Letkukatkaisu 2, yrittäjä D, hammast. terä	CCC = N (D295 /E88 / F14 / G4 / H2 / I1 / J0 /K0)	CCC = N (D182 /E147 / F64 / G26 / H41 / I6 / J1 /K0)
Letkukatkaisu 3, yrittäjä D, hammast. terä	CCC = N (D65 /E27 / F7 / G2 / H5 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D1034 /E19 / F0 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 1, yrittäjä D, sileä terä	CCC = N (D172 /E51 / F12 / G1 / H3 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D70 /E30 / F10 / G7 / H2 / I3 / J3 /K0)
Letkukatkaisu 2, yrittäjä D, sileä terä	CCC = N (D22 /E6 / F3 / G1 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D141 /E92 / F18 / G12 / H15 / I10 / J0 /K1)
Letkukatkaisu 3, yrittäjä D, sileä terä	CCC = N (D54 /E34 / F8 / G3 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D123 /E45 / F14 / G6 / H5 / I3 / J4 /K0)
Letkukatkaisu 1, yrittäjä D, sileä terä ja puhallustulppa	CCC = N (D268 /E45 / F6 / G0 / H1 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D167 /E59 / F6 / G3 / H4 / I0 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 2, yrittäjä D, sileä terä ja puhallustulppa	CCC = N (D109 /E23 / F3 / G0 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D64 /E30 / F3 / G0 / H2 / I0 / J0 /K0)
Letkukatkaisu 3, yrittäjä D, sileä terä ja puhallustulppa	CCC = N (D202 /E69 / F5 / G3 / H0 / I0 / J0 /K0)	CCC = N (D104 /E45 / F4 / G0 / H1 / I3 / J0 /K0)

LIITE 3. KOMPONENTTIEN MÄRKÄPINTA-ALOJEN MÄÄRITYS

Tutkittava märkäpinta-ala	Komponentin mitat	Laskentayhtälö	Muuttujien selitykset
Letkuasennelma <i>Sisäputken pinta-ala</i>	$l_A = 104 \text{ cm}$ $l_B = 101 \text{ cm}$ $d_s = 10 \text{ mm}$	$A = \pi d_s l_{A,B}$	d_s = sisähalkaisija $l_{A,B}$ = letkun pituus, yrittäjä A / yrittäjä B
Kierreläitos <i>Kierreosan pinta-ala, liitoksia 2 kpl</i>	$l_k = 10 \text{ mm}$ $d_k = 17 \text{ mm}$	$A = 2 \pi d_k l_k$	d_k = kierteen keskihalkaisija l_k = kierreosan pituus
Pikaliitos  <i>Vastaventtiilin kartio-osan ja sitä vastaavan ulkokehän pinta-ala, yhteensä 4 kpl</i>	$d_v = 5 \text{ mm}$ $d_u = 13 \text{ mm}$ $l_u = 1 \text{ mm}$ $s_v = 6 \text{ mm}$	$A = 4 \left[\pi \left(\frac{d_v}{2} + \frac{d_u}{2} \right) s_v + \pi d_u l_u \right]$	d_v = vastaventtiilin päätyrenkaan halkaisija d_u = istukkarenkaan sisähalkaisija l_u = istukkarenkaan paksuus s_v = vastaventtiilin kartio-osan sivunpituus
Letkuliitin <i>Sisäputken, tiivistyskartion ja kierreosan pinta-ala</i> 	$d_n = 10 \text{ mm}$ $d_k = 18 \text{ mm}$ $d_{ka} = 15 \text{ mm}$ $l_k = 10 \text{ mm}$ $l_s = 45 \text{ mm}$ $s = 5 \text{ mm}$	$A = \pi d_n l_n + \pi \left(\frac{d_n}{2} + \frac{d_{ka}}{2} \right) s + \pi d_k l_k$	d_n = karaosan sisähalkaisija d_k = kierteen keskihalkaisija d_{ka} = kartion ulkohalkaisija l_k = kierreosan pituus l_n = karaosan pituus s = kartion sivunpituus
Kutistesuoja <i>Sisä- ja ulkopinta</i>	$d_p = 30 \text{ mm}$ $l_p = 34 \text{ mm}$	$A = 2 \pi \frac{d_p^2}{4} + 2 \pi d_p l_p$	d_p = kutistesukan halkaisija l_p = kutistesukan pituus
Puhallustulppa <i>Koko pinta-ala</i>	$d_t = 20 \text{ mm}$ $l_t = 26,5 \text{ mm}$	$A = 2 \pi \frac{d_t^2}{4} + \pi d_t l_t$	d = tulpan halkaisija l_t = tulpan pituus
Letkukatkaistu <i>Sisäputken pinta-ala</i>	$d_s = 10 \text{ mm}$ $l_l = 20 \text{ cm}$	$A = \pi d_s l_l$	d_s = letkun sisähalkaisija l_l = letkun pituus